

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**USO DE SIG PARA DETERMINAR LA VULNERABILIDAD DE
CONTAMINACIÓN EN ACUÍFEROS DE LA YARADA Y LOS
PALOS EN TACNA**

Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil, que presenta el bachiller:

JORGE LUIS CHINCHIHUALPA MARQUEZ

ASESOR: MSC MITCHEL JIMMY JARA GARCÍA

Lima, julio del 2018



A Dios, mis padres y mi hermana

Jorge H., María e Ivonne

Por su constante apoyo y motivación en mi día a día

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar gracias a Dios por darme tantas bendiciones en mi vida como es el inicio de una carrera profesional. Además, agradecerle por darme una familia, buenas amistades y hermanos.

A mis padres, Jorge y María, por darme el ejemplo y apoyo para seguir adelante.

A mi hermana, Ivonne, por siempre estar al lado mío como soporte y sobre todo como una buena amiga.

A mi abuelita, Yolanda, que desde el cielo me cuida y me protege. A mi abuelito Ciro, por ser un gran ejemplo de vida y a mi abuelita Ana, por el gran amor y cariño que me da

A mis tíos y primos que siempre me dieron la perseverancia para seguir adelante.

A mis amigos, por compartir y vivir de grandes experiencias en este caminar

A mis hermanos de Fuerza de Dios, por la alegría, apoyo y la constante ayuda por tener y consagrar mi proyecto de vida entre Dios y mi profesión.

A mi asesor, por su tiempo y dedicación en todos estos meses.

Y a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta Tesis.

Resumen

Los recursos hídricos, como en toda ciudad, son de vital importancia tanto para el consumo humano como para las diversas actividades que se realizan en la zona. Para el caso de los distritos de la Yarada y los Palos, en Tacna, una forma de abastecimiento del recurso es mediante la obtención del mismo a través de los acuíferos, por ello es de gran importancia que se evite la contaminación de ellos. Sin embargo, actividades como la agricultura han ocasionado una demanda tan importante del recurso que hizo que a lo largo de estos años se llegue a pensar en la presencia de altos índices de nitrato, boro o hasta incluso agua salina (proveniente del mar), siendo componentes muy perjudiciales para las aguas dulces.

Ante ello, se ve necesario hacer una evaluación de las vulnerabilidades en los acuíferos con el propósito de reconocer los niveles de contaminación que existe. Tal evaluación se obtiene de los resultados de los métodos GOD, DRASTIC y GALDIT, el cual consiste en la combinación de diferentes mapas aplicando procesamiento de los datos, imágenes satelitales y cartografía con el uso del sistema de información geográfica (SIG). Al aplicar a cada mapa que se obtiene un factor según el método que se aplica se llegan a obtener los 3 mapas de vulnerabilidad, el cual nos permite visualizar la representación en áreas del área de estudio.

Una vez que se obtienen los mapas de vulnerabilidad, el análisis de los resultados indicará qué mapa con los métodos aplicados tendrá un mejor ajuste y si efectivamente evidencia o no regiones con alta vulnerabilidad en el área de estudio. Para las áreas que tengan altos valores de vulnerabilidad es necesario realizar diversas recomendaciones y brindar alternativas de solución con el propósito de mitigar a estos agentes externos que perjudican al acuífero.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : Uso de SIG para determinar la vulnerabilidad de contaminación en acuíferos de La Yarada y Los Palos en Tacna.

Área : Medio ambiente y recursos hídricos

Asesor : Mitchel Jimmy Jara García

Alumno : JORGE LUIS CHINCHIHUALPA MARQUEZ

Código : 2009.7035.412

Tema N° : # 92

Fecha : Lima, 4 de setiembre de 2017



1. RESUMEN

Los recursos hídricos, como en toda ciudad, son de vital importancia tanto para el consumo humano como para las diversas actividades que se realizan en la zona. Para el caso de los distritos de la Yarada y los Palos, en Tacna, una forma de abastecimiento del recurso es mediante la obtención del mismo a través de los acuíferos; es por ello que es de gran importancia que se evite la contaminación de estos mismos. Pese a ello, actividades como la agricultura han ocasionado una demanda tan importante del recurso que hizo que a lo largo de estos años se llegue a pensar en la presencia de altos índices de nitrato, boro o hasta incluso agua salina (proveniente del mar), siendo componentes muy perjudiciales para las aguas dulces. Ante ello, se ve necesario hacer una evaluación de las vulnerabilidades en los acuíferos con el propósito de reconocer los niveles de contaminación que existe y, de esta manera, brindar alternativas de solución en las áreas con respuestas adversas.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Justificación

La Yarada y los Palos son distritos muy dependientes de los recursos de las aguas subterráneas, puesto que, mediante ello, se puede satisfacer las diferentes actividades que se realizan como la agricultura, debido a que es muy escasa la obtención del agua superficial. Es por ello que influye mucho que el recurso cumpla con los límites permisibles de calidad para que no haya problemas tanto para el consumo humano como para la agricultura. Ante la incertidumbre de saber si hay alta vulnerabilidad de los contaminantes en las aguas subterráneas, es importante conocer el grado de condición en la que se encuentran los acuíferos. Si se conoce esos rangos que existe en cada punto de muestreo será posible identificar las zonas que son más susceptibles a la contaminación y, de esta manera, brindar alternativas de solución a esos distritos.

2.2 Antecedentes

La provincia de Tacna ha presentado un clima templado, desértico y con amplitud térmica moderada a lo largo de los años, siendo la media anual de temperatura máxima y mínima de 23.5°C y 12.5°C, respectivamente. Además, la precipitación media acumulada anual está muy por debajo de 100mm (33.4 mm). Por este motivo es considerada como una provincia con pocas lluvias y de clima seco (Esta zona forma parte del desierto de Atacama). Pese a ello, existen varias formas de riego en Tacna, pero no existe una planificación adecuada de los sistemas de los proyectos de riego, en especial en el distrito de La Yarada y Los Palos (Este año fueron considerados mediante el decreto supremo y legislativo N°30358 como distritos), debido a que crece la demanda de áreas agrícolas, requiriendo una mayor cantidad del recurso del agua (IGP, 2015).

62



Asimismo, existe una sobre explotación de los acuíferos de La Yarada y Los Palos puesto que la oferta actual del recurso no abastece en forma satisfactoria las demandas totales. Esta afirmación es causada por el incremento excesivo de pozos (127 a 326 del año 2002 al 2013). Y es que este aspecto trae como consecuencia a que se origine una gradual y permanente descenso de la napa freática, comprometiendo a reservas no renovables e influenciando el riesgo de la intrusión marina. Otro aspecto a tener en cuenta es la expansión del área agrícola, debido a que en 13 años desde el 2000 hubo un incremento de 5mil 933 hectáreas de cultivo (ANA, 2014). Se debe tomar en cuenta que en esa parte de Tacna hay grandes presencias de sales en las aguas y en el suelo, el cual es un problema para la actividad agrícola (Olivo, frutas) y el consumo humano. Ante todas estas circunstancias, se ve necesario realizar una evaluación de las vulnerabilidades de contaminación en este distrito de Tacna, debido a que el recurso hídrico obtenido de los acuíferos es el principal medio de abastecimiento.

Al ser los acuíferos de esta zona el medio de obtención de agua más importante, se han presentado diversos informes e investigaciones, en los que explican que en realidad existe una calidad bacteriológica a partir de muestreos de algunos pozos (Cutimbo, 2012). Además, en otros países que poseen regiones con características parecidas al de la Yarada y los Palos, se han realizado estudios de vulnerabilidad, el cual se puede obtener resultados confiables si en verdad los agentes externos están influyendo en la contaminación de los pozos, a partir de metodologías hidrogeológicas tales como GOD (Ground water occurrence, Overall aquifer class, Depth to groundwater), AVI, DRASTIC (Depth, Recharge, Aquifer, Soil, Topography, Impact, Hydraulic conductivity), SINTACS (Water table depth, Effective infiltration, Unsaturated zone, Soil media, Aquifer media, Hydraulic conductivity, Topographic slope) o GALTIT (Ground water occurrence, Aquifer hydraulic Conductivity, Depth to Groundwater Level above sea, Distance from the Shore, Impact of existing Seawater Intrusion Levels, Thickness of Aquifer being mapped), con el propósito obtener resultados, y proponer soluciones. Ante ello, en países como Marruecos se utilizaron metodologías que van de acuerdo a sus características del lugar como el acuífero de Chaouia Coast, el cual utilizan el método de GALTIT, puesto que te ofrece parámetros relacionados a la intrusión marina (Breaban, 2012). Otras metodologías son usadas con mucha frecuencia puesto que te ofrecen una mayor precisión por la cantidad de parámetros que requieren como es el caso de DRASTIC, y hay otras metodologías que son muy usadas por el simple hecho de que te brindan resultados rápidos, debido a la poca cantidad de información que se requiere como es la metodología GOD.

3. OBJETIVOS Y ALCANCE

3.1 Objetivo principal:

Evaluar la vulnerabilidad en acuíferos de La Yarada y Los Palos en Tacna con el uso de sistema de información geográfica (SIG).

3.2 Objetivos específicos:

- Identificar los factores contaminantes que intervienen en los acuíferos.
- Desarrollar y comparar los métodos DRASTIC, GOD y GALTIT para establecer vulnerabilidades de acuíferos.
- Proponer alternativas de solución respecto a aquellas zonas que alcancen vulnerabilidades medias - altas.

4. ALCANCE

Con la evaluación que se realizará en los acuíferos delimitados, se podrá obtener rangos de vulnerabilidad con gran índice de confiabilidad para diferentes condiciones con el propósito de conocer si los recursos son aptos para el consumo humano o actividad agrícola, y también para brindar una futura alternativa de solución si es que el nivel de vulnerabilidad fuese no despreciable. Para ello, será necesario obtener información como son la profundidad del nivel del agua, recarga neta, formación geológica del suelo, cubierta edáfica bajo la superficie del terreno, pendiente del terreno, conductividad hidráulica del acuífero, grado de confinamiento,

62
JH

litología de la zona no saturada, de las diversas metodologías que se aplicarán para obtener una descripción de sus variables con precisión.

5. METODOLOGÍA

5.1 Identificar los contaminantes que intervienen en los acuíferos

El primer paso es la realización de un protocolo con los datos necesarios y así, obtener los elementos que se encuentren fuera de los rangos permisibles que se encontraran en los acuíferos. El segundo aspecto para ello es la toma de muestra, el cual se tendrá que ir a campo para su respectiva ejecución. Se debe tener en cuenta que la muestra se deberá realizar en un número determinado de pozos (10) dentro de la zona delimitada a tener en consideración. El último aspecto para lograr tal objetivo es ensayar la muestra. Con este último proceso, se podrán obtener los diversos componentes que se hayan adquirido a partir de las muestras. En este instante, se podrá conocer los principales contaminantes a tener en consideración para los acuíferos, en general.

5.2 Desarrollar y comparar los métodos a utilizar para establecer vulnerabilidades de acuíferos. Se tomaron en consideración 3 metodologías para la determinación de vulnerabilidades. El primer método es DRASTIC, el cual es uno de los más utilizados debido a la cantidad de parámetros que hacen que tenga una buena precisión. Para ello, es necesario tener los datos de los siguientes parámetros: Profundidad del nivel del agua, recarga neta, formación geológica que constituye el suelo, cobertura edáfica bajo la superficie del terreno, pendiente del terreno, tipo de material geológico de la zona no saturada y conductividad hidráulica del acuífero (K. Brindha, 2015). El segundo método es GOD. También es un método muy utilizado, debido a que tiene pocos parámetros haciendo menos complicado la obtención de su resultado final. Tales parámetros son los siguientes: Grado de confinamiento hidráulico, litología de la zona no saturada y profundidad del agua subterránea o del acuífero (Cavero, 2013). Por último, el método GALDIT se basa en parámetros que toman en cuenta los acuíferos cercanos al mar, el cual puede tener como principal contaminante el agua salina del mar que se filtra en los acuíferos; por ello, se utiliza los siguientes parámetros: Tipo de acuífero, conductividad hidráulica del acuífero, nivel del agua subterránea sobre el mar, distancia tierra adentro perpendicular a la línea de costa, impacto existente de la intrusión marina y espesor del acuífero (Da Lio, 2015). Una vez obtenido los resultados de los 3 métodos mediante la identificación de las áreas vulnerables a través del procesamiento de los datos, imágenes y cartografía con un software SIG, entonces se comenzará a discutir los resultados de los métodos con una comparación, y de esta manera seleccionar el método de mejor ajuste.

Una vez que se hayan cumplido los objetivos, se hará un análisis de los resultados para llegar a las conclusiones. Para las áreas que tengan altos valores de vulnerabilidad será necesario realizar diversas recomendaciones y propuestas de solución con el propósito mitigar a estos agentes externos que perjudican al acuífero.

6. BIBLIOGRAFÍA

Agüero, V., Pujol, R. (2000). Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. Tesis Lic. Ing. Civil. San José, CR, Universidad de Costa Rica

Asesores técnicos asociados (2002). Plan de gestión de la oferta de agua en las cuencas del ámbito del proyecto Tacna. Lima. Recuperado de:
<http://www.ana.gob.pe:8088/media/10970/tomo%20ii%20bases%20y%20estrategias%20para%20el%20plan.pdf>

Autoridad Nacional del Agua (Abril 2013). Acuífero Caplina. Dirección de planeamiento de Recursos Hídricos. Lima. Recuperado de:
[http://www2.congreso.gob.pe/sicr/comisiones/2012/com2012ciencia.nsf/0/42fcb88a2960f04c05257b5f00783c2d/\\$FILE/10_Acuiifero_Caplina_Tacna.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/comisiones/2012/com2012ciencia.nsf/0/42fcb88a2960f04c05257b5f00783c2d/$FILE/10_Acuiifero_Caplina_Tacna.pdf)
Biondi Antonio (2013) BIONDI ACÉITUNAS. Encuentro Regionales. Tacna. Recuperado de :

<http://www.bcrp.gob.pe/docs/Proyeccion-Institucional/Encuentros-Regionales/2013/tacna/eer-tacna-2013-biondi.pdf>

Breaban, Iuliana. (2012). Application of the method GALDIT for the cartography of groundwaters vulnerability: aquifer of Chaouia Coast. University of Iași, Morocco.

Bosque Sendra, J. (1992). Sistemas de Información Geográfica. Rialp. Madrid.

Cavero, M (2013). Gidahatari – Consultora en recursos hídricos. Recuperado de: gidahatari.com/ih-es/metodos-determinacion-vulnerabilidad

Da Lio, Carol, Kruse, Pietro Teatini, Tosi (2015). Saltwater contamination in the managed low-lying farmland of the Venice coast, Italy: An assessment of vulnerability. Journal of Hydrology. Italy. Recuperado de:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715303594>

Ferrer, L (08 de Agosto de 2014). TACNA: Desbalance hídrico en acuífero de la yarada se agrava. Tacna: La República. Recuperado el 10 de marzo de 2016 de: <http://larepublica.pe/08-08-2014/tacna-desbalance-hidrico-en-acuifero-de-la-yarada-se-agrava>

Foster, E., Hirata, R. (1988). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas: Una metodología basada en datos existentes. OPS-CEPIS

Hispagua (Abril 2007). Aguas subterráneas: Contaminación de las aguas subterráneas. Recuperado de :

http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/especiales/aguas%20subterraneas/3_contaminacion.htm

Gobierno Regional de Tacna(2009). Plan estratégico regional del sector agrario de Tacna. Recuperado de:

http://www.agritacna.gob.pe/gestores/presenta/ofplanificadet/archivos/1117771164_1305064644.pdf

Gutiérrez, R. (2012). Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de las Pampas de Lequezama, mediante los métodos DRASTIC, SINTACS y GOD. (Tesis de postgrado). Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba.

Instituto Geofísico del Perú.(2015). El clima en el Perú: Tacna. Recuperado de: <http://www.met.igp.gob.pe/clima/HTML/tacna.html>

Instituto Geológico y Minero de España (1992). Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno: Aguas Subterráneas. Recuperado de:

http://www.igme.es/igme/publica/libros1_HR/libro75/pdf/lib75/in_10.pdf

K. Brindha, L. Elango.(2015). Cross comparison of five popular groundwater pollution vulnerability index approaches. Journal of Hydrology. India Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415001663>

Lobo Ferreira, J.P., Chachadi, A.G. (2005). Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part 1 - Application to the Portuguese Aquifer of Monte Gordo. The fourth inter-Celtic colloquium on Hydrology and management of water resources

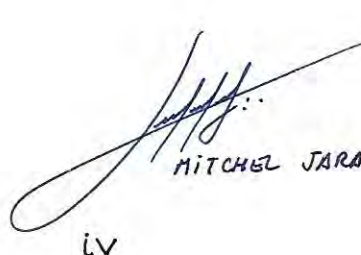
Lobo Ferreira, J.P., Chachadi, A.G. (2005). Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 2 – GALDIT Indicators Description. The fourth inter-Celtic colloquium on Hydrology and management of water resources

Martínez, (2006). Fundamentos de Hidrogeología. Ediciones Mundi-Prensa

Werner, Joerg (1996). Introducción a la hidrogeología. Recuperado de:

http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1080066373/1080066373_03.pdf

Máximo: 100 páginas


MITCHEL JARA
iv


Guillermo Zavala


INDICE

INDICE DE TABLAS.....	viii
INDICE DE FIGURAS	x
CAPITULO 1 GENERALIDADES	1
1.1 Introducción.....	1
1.2.1 Justificación.....	1
1.2.2 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo General.....	4
1.2.2 Objetivos específicos:.....	4
1.2.3 Alcance	4
1.3 Metodología.....	4
1.3.1 Identificar los contaminantes que intervienen en los acuíferos	4
1.3.2 Desarrollar y comparar los métodos a utilizar para evaluar las vulnerabilidades de los acuíferos	5
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO	6
2.1 Acuíferos.....	6
2.1.1 Acuífero libre	6
2.1.2 Acuífero confinado	7
2.1.3 Acuífero artesiano	7
2.1.4 Acuífero semiconfinado.....	7
2.2 Piezometría	7
2.3 Recarga neta.....	8
2.4 Conductividad hidráulica	8
2.5 Vulnerabilidad de contaminación.....	9
2.6 Relación de Riesgo, Peligro y Vulnerabilidad de contaminación.....	10
2.7 Métodos para determinar vulnerabilidades de contaminantes en acuíferos	10
2.7.1 Método DRASTIC.....	10
2.7.1.1 Factores de clasificación de los parámetros del método DRASTIC	11
2.7.1.2 Ponderación de los parámetros del método DRASTIC.....	14
2.7.1.3 Grado de vulnerabilidad de contaminación general	15

2.7.2	Método GOD	15
2.7.2.1	Factores de clasificación de los parámetros del método GOD	16
2.7.2.2	Grado de vulnerabilidad de contaminación general	17
2.7.3	Método GALDIT	18
2.7.3.1	Factores de clasificación de los parámetros del método GALDIT	18
2.7.3.2	Ponderación de los parámetros del método GALDIT	21
2.7.3.3	Grado de vulnerabilidad de contaminación general.	21
2.8	Sistema de información geográfica (SIG).....	22
2.8.1	Definición	22
2.8.2	Forma de uso del SIG para obtener índice de vulnerabilidad	22
CAPITULO 3: METODOLOGÍA Y CÁLCULOS		25
3.1	Área de estudio.....	25
3.2	Identificación de contaminantes que intervienen en los acuíferos	28
3.3	Desarrollo y comparación de los métodos DRASTIC, GOD y GALDIT	31
3.3.1	Procedimientos metodológicos	31
a.	Mapa de Nivel freático	32
b.	Mapa de Recarga Neta	32
c.	Mapa de tipo de suelos	40
d.	Mapa de Pendiente de Suelo	42
e.	Mapa de Litología del acuífero	43
f.	Mapa de Naturaleza de la zona no saturada	43
g.	Mapa de Conductividad hidráulica	43
h.	Mapa de Distancia de la Costa hacia el interior	44
i.	Mapa de Impacto existente de la intrusión marina	44
j.	Mapa de espesor del acuífero	44
3.3.2	Aplicación de los métodos DRASTIC, GOLD y GALDIT	46
CAPITULO 4: DISCUSIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS		51
4.1	Vulnerabilidad del método DRASTIC	51
4.2	Vulnerabilidad del método GOD	53
4.3	Vulnerabilidad del método GALDIT	55
4.4	Comparación de los métodos aplicados	57
4.5	Propuestas de solución de las áreas más vulnerables	60

CAPITULO 5: CONCLUSIONES	66
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	69



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Profundidad del agua (D) – Método DRASTIC	12
Tabla 2: Recarga Neta (R) – Método DRASTIC	12
Tabla 3: Tipo de acuífero (A) – Método DRASTIC.....	12
Tabla 4: Tipo de suelo (S) – Método DRASTIC	13
Tabla 5: Topografía (T) – Método DRASTIC.....	13
Tabla 6: Impacto de la zona no saturada (I) – Método DRASTIC.....	14
Tabla 7: Conductividad hidráulica (C) – Método DRASTIC.....	14
Tabla 8: Factor de ponderación del método DRASTIC.....	15
Tabla 9: Tabla de vulnerabilidad general del método DRASTIC.....	15
Tabla 10: Tabla de vulnerabilidad general del método GOD	17
Tabla 11: Factor de parámetro del tipo de acuífero – Método GALDIT	19
Tabla 12: Factor de parámetro de la conductividad hidráulica del acuífero – Método GALDIT	19
Tabla 13: Factor del parámetro del nivel sobre el nivel del mar – Método GALDIT ...	19
Tabla 14: Factor del parámetro de la distancia desde la costa – Método GALDIT	20
Tabla 15: Factor del parámetro del Impacto existente de la intrusión marina.....	20
Tabla 16: Factor del parámetro de espesor del acuífero – Método GALDIT.....	21
Tabla 17: Factor de ponderación del método GALDIT	21
Tabla 18: Grado de vulnerabilidad GALDIT	21
Tabla 19: Dimensiones de las cuencas de área de estudio.....	25
Tabla 20: Concentraciones químicas usadas para Diagrama Piper	29
Tabla 21: Precipitaciones promedio histórico mensuales – Fondo de Valle (FAO) ...	34
Tabla 22: Precipitaciones promedio histórico mensuales – Alto de Valle (FAO).....	34
Tabla 23: Temperatura medias históricas mensuales – Fondo de Valle (FAO)	36
Tabla 24: Temperatura medias históricas mensuales – Tope de Valle (FAO).....	36
Tabla 25: Coeficientes de Escorrentía.....	38
Tabla 26: Resumen Recarga Neta – Fondo de Valle (FAO).....	39
Tabla 27: Resumen Recarga Neta – Tope de Valle (FAO).....	39
Tabla 28: Valores de conductividad hidráulica	43
Tabla 29: Espesores de acuífero	45

Tabla 30: Comparación de vulnerabilidades de contaminación de los 3 métodos.....57

Tabla 31: Comparación de vulnerabilidades de contaminación de los 3 métodos.....58



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cultivos en área de estudio	2
Figura 2: Ubicación de La Yarada Y Los Palos	3
Figura 3: Tipos de acuíferos.....	8
Figura 4: Método GOD para la evaluación de vulnerabilidad de contaminantes en acuíferos.....	16
Figura 5: Interfaz de software SIG (Quantum Gis) con imagen LANDSAT de la ubicación de La Yarada y Los Palos.....	22
Figura 6: Esquema de mapas para obtener vulnerabilidad con método GALDIT.....	23
Figura 7: Esquema de mapas para obtener vulnerabilidad con método GOD	24
Figura 8: Esquema de mapas para obtener vulnerabilidad con método DRASTIC ..	24
Figura 9: Área de estudio (La Yarada)	26
Figura 10: Jefe de Autoridad Nacional del Agua - Sede Tacna (Ing. Jaime Iglesias) y Especialista en recursos hídricos (Miguel Ramírez Ruiz)	26
Figura 11: Mapa de Ubicación de área de estudio	27
Figura 12: Diagrama de Pipper	29
Figura 13: Pozo IRHS 637 del distrito de La Yarada y Los Palos	30
Figura 14: Visita a área cercana al mar sin índices de cultivo – intrusión marina – Octubre 2016.....	30
Figura 15: Procedimiento metodológico - Esquema	31
Figura 16: Líneas de Tendencia – Recarga Neta	40
Figura 17: Banda1 de imagen Landsat 7 TM+.....	41
Figura 18: Triángulo textural para determinar el porcentaje de arcilla	42
Figura 19: Aplicación del método DRASTIC.....	47
Figura 20: Aplicación del método GOD	48
Figura 21: Aplicación del método GALDIT.....	49
Figura 22: Gráfico porcentual de vulnerabilidad – Método DRASTIC	51
Figura 23: Mapa de vulnerabilidad – Método DRASTIC	52
Figura 24: Gráfico porcentual de vulnerabilidad – Método GOD.....	53
Figura 25: Mapa de vulnerabilidad – Método GOD.....	54
Figura 26: Gráfico porcentual de vulnerabilidad – Método GALDIT	55
Figura 27: Mapa de vulnerabilidad – Método GALDIT	56
Figura 28: Zona de difusión o transición entre el agua dulce y agua marina	61
Figura 29: Ubicación y forma de uso de pozo de recarga.....	62

Figura 30: Canal de infiltración como medio de recarga artificial	62
Figura 31: Sistema de riego mediante surcos	64
Figura 32: Sistema de riego por aspersión	64
Figura 33: Sistema de riego por goteo	64



CAPITULO 1 GENERALIDADES

1.1 Introducción

1.2.1 Justificación

La Yarada y los Palos son distritos que se abastecen de los recursos de las aguas subterráneas, puesto que, mediante ellas, se pueden satisfacer las diferentes actividades que se realizan como la agricultura y el consumo humano. Es por ello que se hace importante que el recurso del agua conserve la calidad necesaria con el propósito de evitar problemas tanto para el consumo para las personas mismas como para la agricultura.

Ante la incertidumbre de conocer que el acuífero sea vulnerable de los contaminantes, es importante representar el grado de condición en la que se encuentran dichos acuíferos. Con una medida de esos rangos que existe en cada punto de muestreo será posible identificar las zonas que son más susceptibles a la contaminación y, de esta manera, proponer algunas alternativas de solución que mitiguen los problemas que se suscitan en la zona de estudio.

1.2.2 Antecedentes

La provincia de Tacna presenta un clima templado, desértico y con amplitud térmica moderada a lo largo de los años, siendo la media anual de temperatura máxima y mínima de 23.5°C y 12.5°C, respectivamente. Además, la precipitación media acumulada anual está muy por debajo de 100mm (33.4 mm). Por este motivo es considerada como una provincia con pocas lluvias y de clima seco (Esta zona forma parte del desierto de Atacama). Pese a ello, existen varias formas de riego en Tacna, pero no existe una planificación adecuada de los sistemas de los proyectos de riego, en especial en el distrito de La Yarada y Los Palos (el año 2015 fueron considerados mediante el decreto supremo y legislativo N°30358 como distritos), debido a que crece la demanda de áreas agrícolas, requiriendo una mayor cantidad del recurso del agua (IGP, 2015).

Asimismo, existe una gran utilización de los acuíferos de La Yarada y Los Palos llegando a que la oferta actual del recurso no abastezca en forma satisfactoria las demandas totales siendo un factor el incremento excesivo de pozos (127 a 326 del año 2002 al 2013). Y es que este aspecto trae como consecuencia que se origine una gradual y permanente descenso de la napa freática, comprometiendo a reservas no renovables e influenciando el riesgo de la intrusión marina. Otro aspecto a tener en

cuenta es la expansión del área agrícola, debido a que en 13 años desde el 2000 hubo un incremento de 5mil 933 hectáreas de cultivo (ANA, 2014).

Se debe tomar en cuenta que en esa parte de Tacna hay altas presencias de sales en las aguas y en el suelo, el cual es un problema para la actividad agrícola (Olivo, frutas) y el consumo humano. Ante todas estas circunstancias, se ve necesario realizar una evaluación de las vulnerabilidades de contaminación de las aguas subterráneas, debido a que el recurso hídrico obtenido de los acuíferos es el principal medio de abastecimiento.



Figura 1: Cultivos en área de estudio
Fuente: Propio

Al ser los acuíferos de esta zona la fuente de agua más importante, se han presentado diversos informes e investigaciones, en los que explican que en realidad existe una calidad bacteriológica a partir de muestreos de algunos pozos (Cutimbo, 2012). Además, en otros países que poseen regiones con características parecidas al de la Yarada y los Palos, se han realizado estudios de vulnerabilidad, el cual se puede obtener resultados confiables si en verdad los agentes externos están influyendo en la contaminación de los pozos, a partir de metodologías hidrogeológicas tales como GOD (Ground water occurrence, Overall aquifer class, Depth to groundwater), AVI, DRASTIC (Depth, Recharge, Aquifer, Soil, Topography, Impact, Hydraulic conductivity), SINTACS (Water table depth, Effective infiltration, Unsaturated zone, Soil media, Aquifer media, Hydraulic conductivity, Topographic slope) o GALDIT (Ground water occurrence, Aquifer hydraulic

Conductivity, Depth to Groundwater Level above sea, Distance from the Shore, Impact of existing Seawater Intrusion Levels, Thickness of Aquifer being mapped) , con el propósito de obtener resultados, y proponer soluciones. Ante ello, en países como Marruecos se utilizaron metodologías que van de acuerdo a las características del lugar de estudio (Tacna) como el acuífero de Chaouia Coast, el cual utilizan el método de GALDIT, puesto que ofrece parámetros relacionados a la intrusión marina (Breaban, 2012). Otras metodologías son usadas con mucha frecuencia puesto que brindan una mayor precisión por la cantidad de parámetros que requieren como es el caso de DRASTIC, y hay otras metodologías que son muy usadas por el simple hecho que brindan resultados rápidos, debido a la poca cantidad de información que se requiere como es la metodología GOD.



Figura 2: Ubicación de La Yarada Y Los Palos
Fuente: Google Earth

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

El objetivo general del presente trabajo es evaluar la vulnerabilidad en acuíferos de La Yarada y Los Palos en Tacna con el uso de sistema de información geográfica (SIG).

1.2.2 Objetivos específicos:

Para este trabajo se tienen los siguientes objetivos específicos:

- A. Identificar los factores contaminantes que intervienen en los acuíferos.
- B. Desarrollar y comparar los métodos DRASTIC, GOD y GALDIT para evaluar las vulnerabilidades de los acuíferos.
- C. Proponer alternativas de solución respecto a aquellas zonas que alcancen vulnerabilidades medias - altas.

1.2.3 Alcance

Con la evaluación que se realizará en los acuíferos delimitados, a partir de los 3 métodos a aplicar (GALDIT, GOD y DRASTIC), se obtendrá rangos de vulnerabilidad con un índice de confiabilidad aceptable para diferentes condiciones, con el propósito de conocer si los recursos hídricos son aptos para el consumo humano o actividad agrícola, además de brindar una futura alternativa de solución si es que el nivel de vulnerabilidad fuese no despreciable. Para ello, será necesario obtener información como la profundidad del nivel del agua, recarga neta, formación geológica del suelo, cubierta edáfica bajo la superficie del terreno, pendiente del terreno, conductividad hidráulica del acuífero, grado de confinamiento, litología de la zona no saturada, etc. que se aplicarán al método que corresponda. La recopilación de información se obtendrá del distrito de La Yarada y Los Palos.

1.3 Metodología

1.3.1 Identificar los contaminantes que intervienen en los acuíferos

El primer paso es la realización de un protocolo con los datos necesarios y así, obtener los elementos contaminantes críticos que se encuentren fuera de los rangos permisibles que se encontraran en los acuíferos. El segundo aspecto será la toma de muestra de los principales agentes de contaminación de las aguas dulces, el cual se tendrá que realizar un trabajo de campo. Se debe tener en cuenta que la muestra se deberá realizar en un número determinado de pozos (140, según la guía de muestreo establecido por el

MINAM) dentro de la zona delimitada a tener en consideración. El último aspecto para lograr tal objetivo es ensayar el muestreo o en todo caso conseguir la información fidedigna, el cual pueda trabajarse con ello. Con este último proceso, se podrán obtener los diversos componentes que se hayan adquirido a partir de las muestras. Con ello, todos estos insumos permitirán conocer los mapas correspondientes a tener en consideración, aplicados en los métodos, para su respectivo análisis e interpretación.

1.3.2 Desarrollar y comparar los métodos a utilizar para evaluar las vulnerabilidades de los acuíferos

Se tomaron en consideración 3 metodologías para la determinación de vulnerabilidades. El primer método es DRASTIC (Aller et Al, 1987), el cual es uno de los más utilizados debido a la cantidad de parámetros que hacen que tenga una buena precisión. Para ello, es necesario tener los datos de los siguientes parámetros: Profundidad del nivel del agua, recarga neta, formación geológica que constituye el suelo, cobertura edáfica bajo la superficie del terreno, pendiente del terreno, tipo de material geológico de la zona no saturada y conductividad hidráulica del acuífero (K. Brindha, 2015). El segundo método es GOD. También es un método muy utilizado, debido a que tiene pocos parámetros haciendo menos complicado la obtención de su resultado final. Tales parámetros son los siguientes: Grado de confinamiento hidráulico, litología de la zona no saturada y profundidad del agua subterránea o del acuífero (Cavero, 2013). Por último, el método GALDIT se basa en parámetros que toman en cuenta los acuíferos cercanos al mar, el cual puede tener como principal contaminante el agua salina del mar que se filtra en los acuíferos, por ello utiliza los siguientes parámetros: Tipo de acuífero, conductividad hidráulica del acuífero, nivel del agua subterránea sobre el mar, distancia tierra adentro perpendicular a la línea de costa, impacto existente de la intrusión marina y espesor del acuífero (Da Lio, 2015). Una vez obtenido los resultados de los 3 métodos identificados de las áreas vulnerables (a través del procesamiento de los datos, imágenes y cartografía con un software SIG) se discutirán los resultados de los métodos comparándolos, y de esta manera seleccionar el método de mejor ajuste.

Finalmente, se realizará un análisis de los resultados para determinar las principales conclusiones que responden a los objetivos trazados en el trabajo. De obtenerse un alto porcentaje de áreas altamente vulnerables será necesario realizar diversas recomendaciones con el propósito mitigar a estos agentes externos que perjudican al acuífero.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Acuíferos

Es el medio poroso en el que se mueven las aguas subterráneas. Se confinan en rocas que conducen cantidades de agua económicamente utilizables. Entre las principales funciones del acuífero se debe considerar el almacenamiento del agua subterránea, conductor de agua subterránea y medio de intercambio geoquímico (Werner , 1996)

Tomando en cuenta su comportamiento hidrogeológico, se puede clasificar los acuíferos en:

- *Acuíferos*: Rocas que se caracterizan por almacenar y transmitir agua en grandes cantidades (Martínez, 2006).
- *Acuitardos*: Aquellas rocas que pueden almacenar agua, pero se transmiten lentamente, es decir son materiales porosos poco permeables (Martínez, 2006).
- *Acuicludos*: Son el tipo de rocas con una capacidad de almacenamiento significativo, pero con capacidad de transmisión casi nula (Martínez, 2006).
- *Acuífugos*: Rocas que ni almacenan ni transmiten agua (Martínez, 2006).

El límite entre unos y otros tipos de roca no está claramente definido, y en la práctica la consideración de una unidad geológica como acuífero suele establecerse en función de la naturaleza del resto de las unidades geológicas de la región (Martínez, 2006).

Según las condiciones hidráulicas y la estructura geológica de los materiales que conforman los acuíferos, se pueden clasificar en:

2.1.1 Acuífero libre

Cuando el agua almacenada en un acuífero está en contacto directo con la atmósfera a través de los poros y fisuras de la roca. Se cumple que el límite superior de la zona saturada, la superficie freática, es una superficie física lugar geométrico de los puntos en los que el agua subterránea se encuentra a la presión atmosférica. En cualquier punto por debajo de la superficie freática el agua está a una presión mayor que la atmosférica (está a la presión atmosférica más la correspondiente al peso de la columna de agua que carga sobre ese punto). Se supone que el peso de la roca no ejerce ninguna presión

sobre el agua que en ella se almacena, es decir, que el esqueleto del acuífero es una estructura independiente y estable (si se vacía de agua, la roca no se desmorona) (Martínez, 2006).

2.1.2 Acuífero confinado

Se le denomina acuífero confinado cuando un acuífero está aislado de la atmósfera por unidades geológicas impermeables. Un acuífero confinado está siempre saturado de agua y en todos sus puntos el agua se encuentra a una presión mayor que la atmosférica (Martínez, 2006).

2.1.3 Acuífero artesiano

Si se perfora un sondeo hasta alcanzar un acuífero confinado, el agua del acuífero ascenderá en el interior de ese sondeo hasta alcanzar un equilibrio entre la presión a la que se encuentra sometida y la presión atmosférica. A este fenómeno se le denomina artesianismo. Si la presión fuese suficiente, el agua podría ascender por encima de la superficie del terreno originándose un fenómeno de surgencia (Martínez, 2006).

2.1.4 Acuífero semiconfinado

Si las unidades confinantes permiten un cierto flujo de agua desde el acuífero hacia el exterior o viceversa, al acuífero se le llama semiconfinado (Martínez, 2006).

2.2 Piezometría

Los pozos de los acuíferos son una representación del nivel freático de un acuífero como el libre. En otros tipos de acuíferos como el confinado el nivel de la presión del acuífero viene a ser el correspondiente al espejo del pozo. Ante ello, el nivel que se mide de los pozos viene a ser la definición del nivel piezométrico, el cual se puede calcular como la altura a partir de un plano de referencia (Werner, 1996). Además, la altura de diversos puntos de un acuífero en base a un plano de referencia viene a definirse como superficie piezométrica.

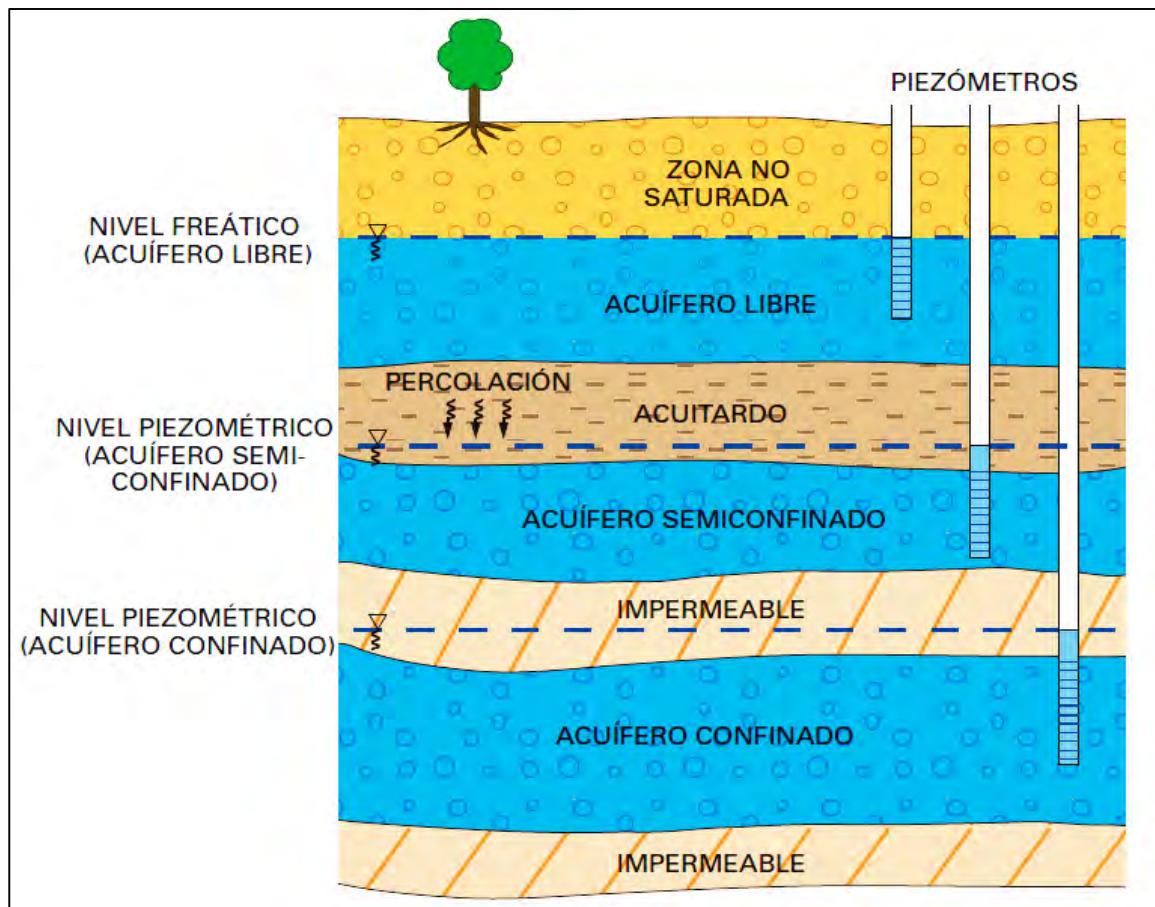


Figura 3: Tipos de acuíferos
Fuente: (Martínez, 2006).

2.3 Recarga neta

La recarga neta se define como el volumen por unidad de área de agua que ingresa al acuífero. La entrada al acuífero puede darse de 2 maneras siendo el descenso del agua influenciado por la gravedad y el otro aspecto se da por las condiciones hidráulicas de todo el perfil del suelo. Se debe tener en consideración que el ingreso del agua a un acuífero es el origen de la contaminación del mismo, debido al arrastre de este recurso con otras sustancias en el exterior.

2.4 Conductividad hidráulica

Es una constante de proporcionalidad definida como la facilidad con la que un material poroso deja pasar un fluido siendo dependiente de la densidad del flujo, permeabilidad, viscosidad, y características del medio poroso. Este coeficiente tiene dimensiones de velocidad, además, pueden ser de 2 tipos: Conductividad hidráulica darciana (depende de las características del medio y del fluido) o lineal, y conductividad hidráulica turbulenta (se toma en cuenta una nueva propiedad denominada rugosidad equivalente).

2.5 Vulnerabilidad de contaminación

Para entender el significado de toda la expresión es esencial tener la definición de contaminación, el cual se refiere a lo siguiente: *“la acción y el efecto de introducir materias o formas de energía o inducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica”* (Gencat, 1992).

En cuanto al significado de vulnerabilidad, existen diversas definiciones. Una de ellas alude al riesgo que se produzca un deterioro de la calidad de las aguas subterráneas por vertidos o actividades potencialmente contaminantes (IGME, 1992). Ante ello, la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación expresa la sensibilidad de las aguas subterráneas a una alteración de la calidad originada por actividades humanas, estando en función de una serie de características intrínsecas del acuífero, referidas a la parte del terreno situada sobre la superficie piezométrica (Foster, 1991). La vulnerabilidad depende de 2 factores importantes:

- a) Accesibilidad hidráulica de la zona no saturada a la penetración de los contaminantes.
- b) La retención físico-química o la reacción de los contaminantes con el terreno tomando en cuenta la capacidad de atenuación de dicha zona.

Para los acuíferos libres, la zona no saturada es un aspecto importante para constituir una poderosa línea de defensa natural contra la contaminación. Además, el nivel de contaminación de las aguas subterráneas está también condicionado por agentes factores externos, unos se deben al origen climatológico-pluviométrico y temperatura, y otros se deben a la carga contaminante (proceso y zona de penetración del contaminante y movilidad y persistencia del contaminante). La interacción de los factores que se han mencionado, determina el potencial de riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas, siempre referido a una ubicación determinada (Hispagua, 2007). Otros factores muy importantes vienen a ser los mecanismos de incorporación del contaminante al acuífero, los cuales se enumeran a continuación:

- La infiltración a través de la zona no saturada en áreas de recarga
- Pérdidas en ríos o volúmenes de agua superficial relacionadas con el acuífero

- Incremento de sondeos y pozos
- Intrusión de las aguas salinas para acuíferos cercanos al litoral marino.

2.6 Relación de Riesgo, Peligro y Vulnerabilidad de contaminación

El peligro de contaminación tiene una definición parecida al de vulnerabilidad pero no son lo mismo. Peligro viene a ser la probabilidad que se dé una ocurrencia de una situación peligrosa siendo que el agua subterránea sea contaminada superando los límites permisibles de calidad.

Para determinar el peligro de contaminación de una determinada área de estudio, se toman 2 aspectos importantes: Los perímetros de protección de los pozos y el mapa de vulnerabilidad de contaminación. Al tener estas informaciones se deben superponer para llegar a evaluar el peligro de contaminación

En cuanto al riesgo, se define como la probabilidad de ocurrencia de las consecuencias de contaminación en el área de estudio desde el momento de impacto hasta su propia reconstrucción de protección ante un contaminante. Para ello, el riesgo se puede determinar mediante la relación que se da entre el peligro y vulnerabilidad (Cardona, 1985).

$$Riesgo = Peligro * Vulnerabilidad$$

... (1)

Si bien es cierto que el principal objetivo de este trabajo es el de evaluar las vulnerabilidad de contaminación, se darán recomendaciones y sugerencias de soluciones como medida de protección ante estas vulnerabilidades, pero no abarcará la evaluación del peligro ni del riesgo de contaminación en los acuíferos del área de estudio

2.7 Métodos para determinar vulnerabilidades de contaminantes en acuíferos

2.7.1 Método DRASTIC

Esta metodología viene a ser un modelo empírico realizado por Aller en el año 1987 para la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA).

El método DRASTIC es uno de los más utilizados, debido a la cantidad de parámetros que ofrece cuando se quiere aplicar mapas de vulnerabilidad, lo que la hace más confiable que otras metodologías.

Los parámetros provienen de la palabra DRASTIC, el cual cada una de ellas se puede calcular según valores que van desde 1 (mínima vulnerabilidad) hasta 10 (máxima vulnerabilidad), además de tomar en cuenta su nivel de influencia valorizadas entre 1 y 5 (Aller et Al, 1987). La forma de obtener el resultado final es la multiplicación de la vulnerabilidad por su grado de influencia de cada parámetro, y luego sumándose cada una de ellas, tal como se muestra en la ecuación (2):

$$DRASTIC = (Dr \cdot Dw) + (Rr \cdot Rw) + (Ar \cdot Aw) + (Sr \cdot Sw) + (Tr \cdot Tw) + (Ir \cdot Iw) + (Cr \cdot Cw)$$

... (2)

En donde: r = Factor de clasificación o valoración

w = Factor de ponderación

D = Profundidad del agua subterránea

R = Recarga Neta

A = Litología del acuífero

S = Tipo de suelo

T = Topografía

I = Naturaleza de la zona no saturada

C = Conductividad hidráulica

2.7.1.1 Factores de clasificación de los parámetros del método DRASTIC

El método DRASTIC está conformado por 7 parámetros, cada inicial proveniente de nombres de los parámetros en inglés, el cual se clasifican de la siguiente manera:

D (depth): Profundidad del agua subterránea. Para ser más exacto, la distancia se da entre la altura del suelo y el nivel freático, obteniéndose de los monitoreos piezométricos en el área de estudio. En la tabla 1 se muestra la clasificación de este parámetro:

Tabla 1: Profundidad del agua (D) – Método DRASTIC

Profundidad (m)	Clasificación Dr
0 – 1.5	10
1.5 – 4.6	9
4.6 – 9.1	7
9.1 – 15.2	5
15.2 – 22.9	3
22.9 – 30.5	2
> 30.5	1

Fuente: (Aller et al, 1987)

R (Recharge): Recarga neta. Viene a ser el volumen total de agua que recarga el acuífero; el cual, puede ser obtenido mediante el balance hidrológico del respectivo acuífero. La Clasificación para este parámetro se observa en la tabla 2:

Tabla 2: Recarga Neta (R) – Método DRASTIC

Recarga (mm)	Valoración R _r
0-50	1
50-103	3
103-178	6
178-254	8
> 254	9

Fuente: (Aller et al, 1987)

A (Acuifer): Litología del acuífero. El parámetro indica la formación geológica del acuífero. Cada formación geológica se clasifica tal como se ve en la tabla 3.

Tabla 3: Tipo de acuífero (A) – Método DRASTIC

Litología del acuífero	Valoración Ar	Valor típico Ar
Lutita masiva	1 -3	2
Metamórfica/Ígnea	2 -5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 -5	4
Till glacial	4 -6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 -9	6
Arenisca masiva	4 -9	6
Caliza masiva	4 -9	6
Arena o grava	4 -9	8
Basaltos	2 -10	9
Caliza kárstica	9 -10	10

Fuente: (Aller et al, 1987)

S (Soll): Tipo de suelo. A partir de la estratigrafía de los piezómetros, se puede obtener el tipo de suelo siendo la parte superficial de área de estudio. La valoración a cada tipo de suelo se muestra en la tabla 4

Tabla 4: Tipo de suelo (S) – Método DRASTIC

Tipo de suelo	Valoración S_r
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol-cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

Fuente: (Aller et al, 1987)

T (Topography): topografía. Mediante un plano de curvas topográficas se puede obtener la pendiente topográfica del área de estudio. Según el porcentaje de pendiente se clasifica tal como se muestra en la tabla 5

Tabla 5: Topografía (T) – Método DRASTIC

Pendiente (%)	Valoración T_r
0-2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
> 18	1

Fuente: (Aller et al, 1987)

I (Impact): Naturaleza de la zona no saturada. Se refiere al material del acuífero que no está cubierto con agua (parte no saturada del acuífero). La estratigrafía de los piezómetros permite obtener estos valores, además de reconocer al tipo de material en el área de estudio, tal como se observa en la tabla 6.

Tabla 6: Impacto de la zona no saturada (I) – Método DRASTIC

Naturaleza de la zona no saturada	Valoración I_r	Valor típico I_r
Capa confinante	1	1
Cieno-arcilla	2 - 6	3
Lutita	2 - 5	3
Caliza	2 - 7	6
Arenisca	4 - 8	6
Secuencias de arenisca, caliza y Lutita	4 - 8	6
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4 - 8	6
Metamórfica/Ignea	2 - 8	4
Grava y arena	6 - 9	8
Basalto	2 - 10	9
Caliza kárstica	8 - 10	10

Fuente: (Aller et al, 1987)

C (Hydraulic conductivity): Conductividad hidráulica. Es la facilidad de un cuerpo a ser atravesado por algún fluido obtenido por ensayos de permeabilidad realizados en campo. La valoración se muestra en la tabla 7.

Tabla 7: Conductividad hidráulica (C) – Método DRASTIC

Conductividad hidráulica		Valoración C_r
m/día	cm/s	
0,04-4,08	$4,6 \cdot 10^{-5}$ - $4,7 \cdot 10^{-3}$	1
4,08-12,22	$4,7 \cdot 10^{-3}$ - $1,4 \cdot 10^{-2}$	2
12,22-28,55	$1,4 \cdot 10^{-2}$ - $3,4 \cdot 10^{-2}$	3
28,55-40,75	$3,4 \cdot 10^{-5}$ - $4,7 \cdot 10^{-2}$	6
40,75-81,49	$4,7 \cdot 10^{-2}$ - $9,5 \cdot 10^{-2}$	8
> 81,49	> $9,5 \cdot 10^{-2}$	10

Fuente: (Aller et al, 1987)

2.7.1.2 Ponderación de los parámetros del método DRASTIC

Cada variable da un valor (ponderación), según la influencia que tendrá para obtener la vulnerabilidad de contaminación. Además, debe tenerse en cuenta si es que incluye o

no el pesticida (no se usa para el área de estudio), puesto que este aspecto cambia en la reclasificación, tal como se observa en la tabla 8. El rango de la ponderación oscila entre 1 y 5, siendo el valor de 5 el de mayor influencia, mientras que el valor de 1 es el de menor influencia.

Tabla 8: Factor de ponderación del método DRASTIC

Tipo de contaminante	Variable						
	Dw	Rw	Aw	Sw	Tw	Iw	Cw
Pesticida	5	4	3	5	3	4	2
No pesticida	5	4	3	2	1	5	3

Fuente: (Aller et al, 1987)

2.7.1.3 Grado de vulnerabilidad de contaminación general

Cuando se realiza todo el proceso, el resultado obtenido puede estar entre los valores de 23(muy bajo) y 230(muy alto). Pese a ello, los valores en la práctica varían entre 50 y 200. En la tabla 9 se muestra la clasificación del método Drastic.

Tabla 9: Tabla de vulnerabilidad general del método DRASTIC

Vulnerabilidad general		Vulnerabilidad a pesticidas	
Grado vulnerabilidad	Valor DRASTIC	Grado vulnerabilidad	Valor DRASTIC
Muy bajo	23-64	Muy bajo	26-73
Bajo	65-105	Bajo	74-120
Moderado	106-146	Moderado	121-167
Alto	147-187	Alto	168-214
Muy alto	188-230	Muy alto	215-260

Fuente: (Aller et al, 1987)

2.7.2 Método GOD

El método GOD es un modelo de vulnerabilidad, cuyo nombre proviene de las iniciales de los parámetros que intervienen en esta metodología (G:Groundwater confinement, O: Overlying strata y D: Depth to groundwater table) . Es a partir de ello que al tener solamente 3 parámetros, es un método práctico. Uno de los parámetros de este método es el grado de inaccesibilidad de la zona no saturada. El otro factor importante es la capacidad de atenuación de los estratos suprayacentes a la zona saturada del acuífero.

2.7.2.1 Factores de clasificación de los parámetros del método GOD

Este método tiene una serie de procesos. El primer aspecto a tener en cuenta es el grado de confinamiento hidráulico (G) del acuífero que se encuentra en un rango de 0 a 1 siendo 0 como ninguno o surgente, y 1 como no confinado.

El segundo parámetro es la ocurrencia del estrato suprayacente (O). Se refiere a las características litológicas y el grado de consolidación de la zona no saturada o capa no confinantes. El intervalo de valores esta entre 0.4 y 1. La figura 4 detalla la forma de obtener el factor tomando en cuenta las características mencionadas con sus respectivas relaciones entre ellas mismas.

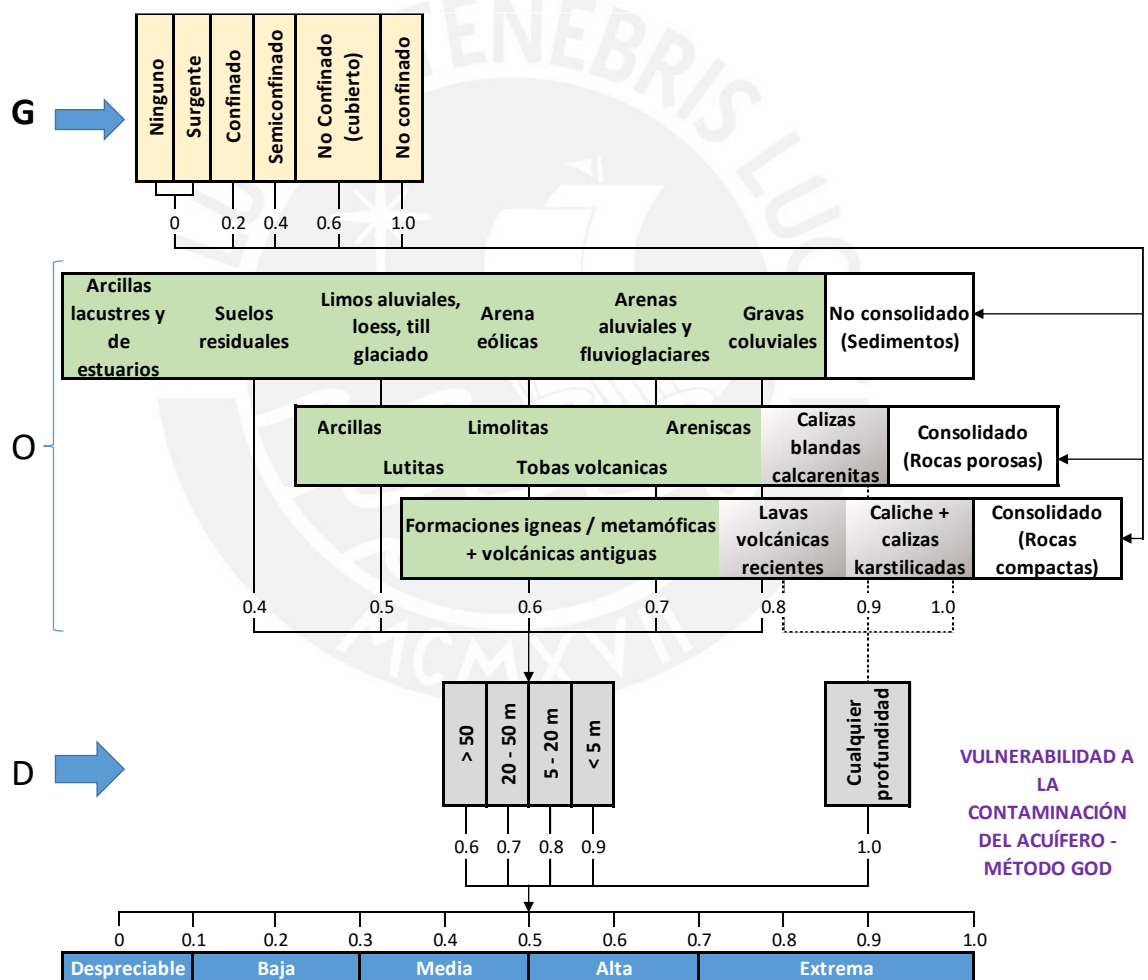


Figura 4: Método GOD para la evaluación de vulnerabilidad de contaminantes en acuíferos
Fuente: (Foster, Hirata, 1988)

El último parámetro a considerarse en esta metodología se basa en obtener la distancia al nivel del agua subterránea si es que no es confinado, o la distancia al techo del acuífero para el caso de que fuese confinado (D) dando valores entre 0.6 y 1. Se toma

en consideración que este parámetro es el único que varía en función al tiempo. Se debe considerar que aquellos coeficientes del factor O con valores mayores a 0.8 se representarán con un factor de 1 mientras que los demás valores se obtendrán según lo indicado en la figura 4.

2.7.2.2 Grado de vulnerabilidad de contaminación general

La forma de obtener la vulnerabilidad de contaminación usando este método es mediante la multiplicación de los 3 parámetros siendo el resultado entre 0 y 1, en el que 0 es una vulnerabilidad despreciable y 1 es una vulnerabilidad muy alta.

La forma de obtener el resultado de la vulnerabilidad de contaminación con esta metodología es a partir de la ecuación (3):

$$iV = G * O * D$$

... (3)

Donde:

iV= Índice de grado de vulnerabilidad de contaminación

G= Grado de confinamiento hidráulico

O= Ocurrencia del sustrato suprayacente

D= Distancia al nivel del agua subterránea o al techo del acuífero

Tabla 10: Tabla de vulnerabilidad general del método GOD

Grado vulnerabilidad	Valor GOD
Despreciable	0 - 0.1
Bajo	0.1 - 0.3
Medio	0.3 - 0.5
Alto	0.5 - 0.7
Muy alto	0.7 - 1.0

Fuente: (Foster, 1987)

2.7.3 Método GALDIT

La metodología GALDIT, al igual que los otros 2 métodos definidos anteriormente, tiene su nombre en función a las iniciales de los nombres de los 6 parámetros que está compuesto, las cuales son: Tipo de acuífero, conductividad hidráulica, nivel del agua subterránea sobre el mar, distancia tierra adentro perpendicular a la línea de costa, impacto existente de la intrusión marina y espesor del acuífero.

La principal característica de este método es que se utiliza para acuíferos que se encuentran muy cerca al litoral marino, siendo la intrusión marina el contaminante. Una definición de vulnerabilidad de contaminación de acuíferos debido a la intrusión marina es la sensibilidad de la calidad del agua subterránea impuesta por el bombeo del agua subterránea o por el aumento del nivel del mar en la franja costera que se determina por las características intrínsecas del acuífero.

La forma de obtener el resultado de la vulnerabilidad de contaminación con esta metodología es a partir de la ecuación (4):

$$V.GALDIT = \frac{\sum_{i=1}^6 W_i * R_i}{\sum_{i=1}^6 W_i}$$

... (4)

Donde:

R= Factor de clasificación o valoración.

W=Factor de ponderación.

2.7.3.1 Factores de clasificación de los parámetros del método GALDIT

G (Groundwater occurrence): El tipo de acuífero; el cual es confinado, no confinado y semiconfinado. Para un acuífero confinado considerar que el cono de depresión es mayor, además que hay una gran liberación instantánea de agua obtenido de los pozos. En la tabla 11 se muestra el factor que se da a cada tipo de acuífero.

Tabla 11: Factor de parámetro del tipo de acuífero – Método GALDIT

Indicador	Variables	Factor
Tipo de acuífero	Acuífero confinado	10
	Acuífero no confinado	7.5
	Acuífero semiconfinado	5
	Acuífero delimitado	2.5

Fuente: (Chachadi et al, 2005)

A (Aquifer Hydraulic Conductivity): Conductividad hidráulica del acuífero. Al igual que el parámetro usado en el método DRASTIC, la conductividad hidráulica de un acuífero se define como la habilidad de un acuífero de transmitir agua; el cual es un aspecto importante para el movimiento del agua del mar. Por lo que si la conductividad hidráulica es mayor, entonces el movimiento del agua del mar al interior será mayor. En la tabla 12 se muestra los factores en función a este parámetro.

Tabla 12: Factor de parámetro de la conductividad hidráulica del acuífero – Método GALDIT

Indicador	Variables		Factor
	Clase	Rango	
Conductividad hidráulica del acuífero	Alto	>40	10
	Medio	10 - 40	7.5
	Bajo	5 - 10	5
	Muy bajo	<5	2.5

Fuente: (Chachadi et al, 2005)

L (Level above Sea Level): Nivel sobre el nivel del mar. Importante considerar la altura del acuífero respecto al nivel del mar, puesto que está muy relacionado a la disponibilidad que la línea del agua del mar retrocede, todo ello en la tabla 13.

Tabla 13: Factor del parámetro del nivel sobre el nivel del mar – Método GALDIT

Indicador	Variables		Factor
	Clase	Rango	
Altura del nivel del agua subterránea sobre el nivel del mar	Alto	<1	10
	Medio	1.0 - 1.5	7.5
	Bajo	1.5 - 2.0	5
	Muy bajo	>2.0	2.5

Fuente: (Chachadi et al, 2005)

D (Distance from the shore): Distancia de la costa hacia el interior perpendicular. El impacto que hay de la intrusión marina decrece con el movimiento con ángulo recto hacia el interior. La marea alta es un indicador de aquello dejando una línea enmarcada en la costa. En la tabla 14 se muestra la clasificación que se da a cada rango de distancia.

Tabla 14: Factor del parámetro de la distancia desde la costa – Método GALDIT

Indicador	Variables		Factor
	Clase	Rango	
Distancia desde la costa / marea alta (m)	Alto	<500	10
	Medio	500 - 750	7.5
	Bajo	750 - 1000	5
	Muy bajo	>1000	2.5

Fuente: (Chachadi et al, 2005)

I (Impact of existing status of sea water intrusion in the area): Impacto existente de la intrusión marina. Este parámetro tiene gran relación con el equilibrio hidráulico natural entre el agua del mar y el agua subterránea. En la tabla 15 se muestra la clasificación en función al indicador.

Tabla 15: Factor del parámetro del Impacto existente de la intrusión marina

Indicador	Variables		Factor de $Cl^- / [HCO_3^{1-} + CO_3^{2-}]$
	Clase	Rango de $Cl^- / [HCO_3^{1-} + CO_3^{2-}]$	
Impacto existente de la intrusión marina	Alto	>2	10
	Medio	1.5 - 2.0	7.5
	Bajo	1.0 - 1.5	5
	Muy bajo	<1.0	2.5

Fuente: (Chachadi et al, 2005)

T (Thickness of Aquifer being mapped): Espesor del acuífero. Este parámetro se basa en la importancia en la extensión y magnitud de la intrusión marina en las costas. Queda establecido que ante un mayor espesor, mayor será el grado de la intrusión marina. En la tabla 16 se muestra la clasificación para este parámetro.

Tabla 16: Factor del parámetro de espesor del acuífero – Método GALDIT

Indicador	Variables		Factor
	Clase	Rango	
Espesor del acuífero (Saturado)	Grande	>10	10
	Mediano	7.5 - 10	7.5
	Pequeño	5 - 7.5	5
	Muy pequeño	<5	2.5

Fuente: (Chachadi et al, 2005)

2.7.3.2 Ponderación de los parámetros del método GALDIT

A cada variable se le da un valor (ponderación), según la clasificación que tendrá para obtener la vulnerabilidad de contaminación. Es vital el peso de cada parámetro puesto que refleja el nivel de importancia de la intrusión marina, tal como se observa en la tabla 17. El rango de la ponderación oscila entre 1 y 4, siendo el valor de 4 el de mayor influencia, mientras que el valor de 1 es el de menor influencia.

Tabla 17: Factor de ponderación del método GALDIT

Peso	Variable					
	Gw	Aw	Lw	Dw	Iw	Tw
	1	3	4	4	1	2

Fuente: (Chachadi et al, 2005)

2.7.3.3 Grado de vulnerabilidad de contaminación general.

Tomando en cuenta los valores máximo y mínimo de este método, los valores tienen un rango entre 2.5 y 10, siendo el más bajo un valor de baja vulnerabilidad, mientras que 10 es alta vulnerabilidad. En la tabla 18 se detalla el grado de vulnerabilidad.

Tabla 18: Grado de vulnerabilidad GALDIT

Grado vulnerabilidad	Valor GALDIT
Alta vulnerabilidad	>7.5
Mediana vulnerabilidad	5 - 7.5
Baja vulnerabilidad	<5

Fuente: (Chachadi et al, 2005)

2.8 Sistema de información geográfica (SIG)

2.8.1 Definición

El sistema de información geográfica (SIG) es un conjunto de informaciones y herramientas que se complementan entre ellos mismos con el propósito de manipular, analizar y modelar la base de datos que se obtiene de algún sitio en específico vistos en forma espacial; es decir, geográficamente referenciada (Bosque, 1992).

Los sistemas de información geográfica son una poderosa forma de obtener resultados en los diferentes aspectos que ofrece el recurso hídrico (vulnerabilidades de contaminación para este caso), teniendo en cuenta que es bien práctico obtener resultados usando SIG, en base a la variación del agua espacialmente y temporalmente. En la figura 5 se observa la interfaz de un software SIG.

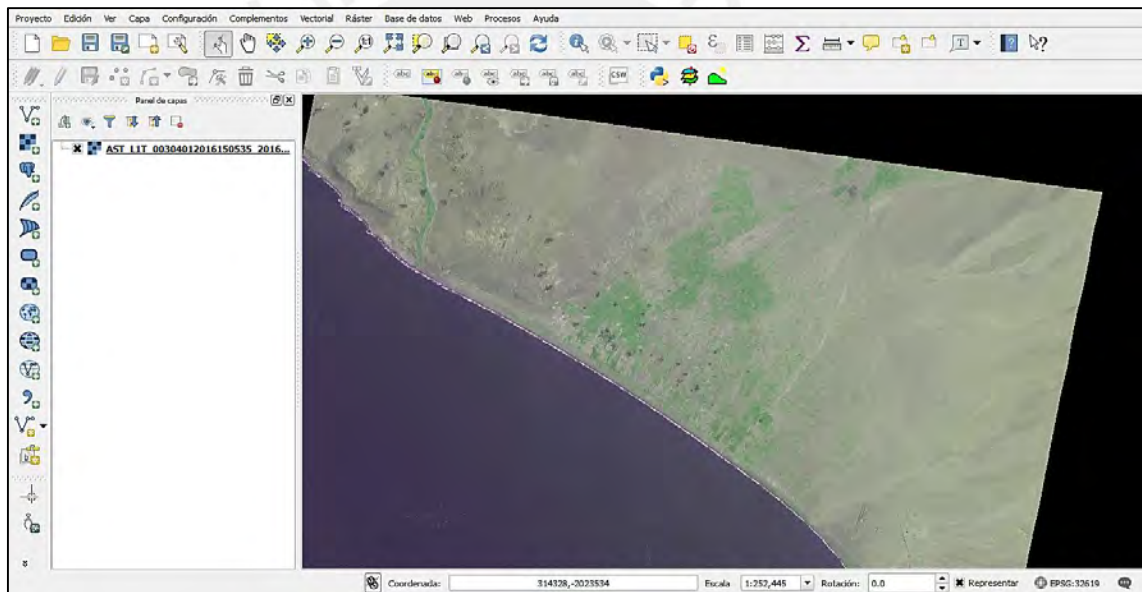


Figura 5: Interfaz de software SIG (Quantum Gis) con imagen LANDSAT de la ubicación de La Yarada y Los Palos.

Fuente propia

2.8.2 Forma de uso del SIG para obtener índice de vulnerabilidad

Para obtener el índice de vulnerabilidad de contaminación de un acuífero, se requiere utilizar el sistema de información geográfica a partir de la obtención de información del área a estudiar, software (para este trabajo se tomaron en cuenta el uso tanto de ArcGis como Quantum Gis) para su aplicación y, por último el conjunto de procesos y resultados. Para ello, se deben tener en cuenta 3 procesos importantes: Análisis de

superficie (pendiente), interpolación, reclasificación y álgebra de mapas (Aguaysig, 2011).

El primer paso para obtener el índice de vulnerabilidad es la construcción de los mapas que representen cada uno de los parámetros que se requiera mediante métodos determinísticos o geoestadísticos. El segundo paso consiste en la reclasificación de los mapas que se han desarrollado, según la representación final que establece cada método (DRASTIC, GOD o GALDIT). Para aquellos parámetros que se basan en informaciones no numéricas, se les cuantifica según la clasificación de los 3 métodos, tal como se indican en las tablas del 1 al 18 de cada parámetro desarrollado de las metodologías mencionadas. El último paso indispensable es el álgebra de mapas, el cual se refiere al peso que se le da a cada parámetro.

Finalizando, a partir de varios mapas y sus reclasificaciones se obtiene un solo mapa, el cual viene a representar el índice de vulnerabilidad de contaminación de los acuíferos en donde nos permite visualizar y analizar el grado de vulnerabilidad del área de estudio. Los métodos son representados a través de la figura 6, 7 y 8.

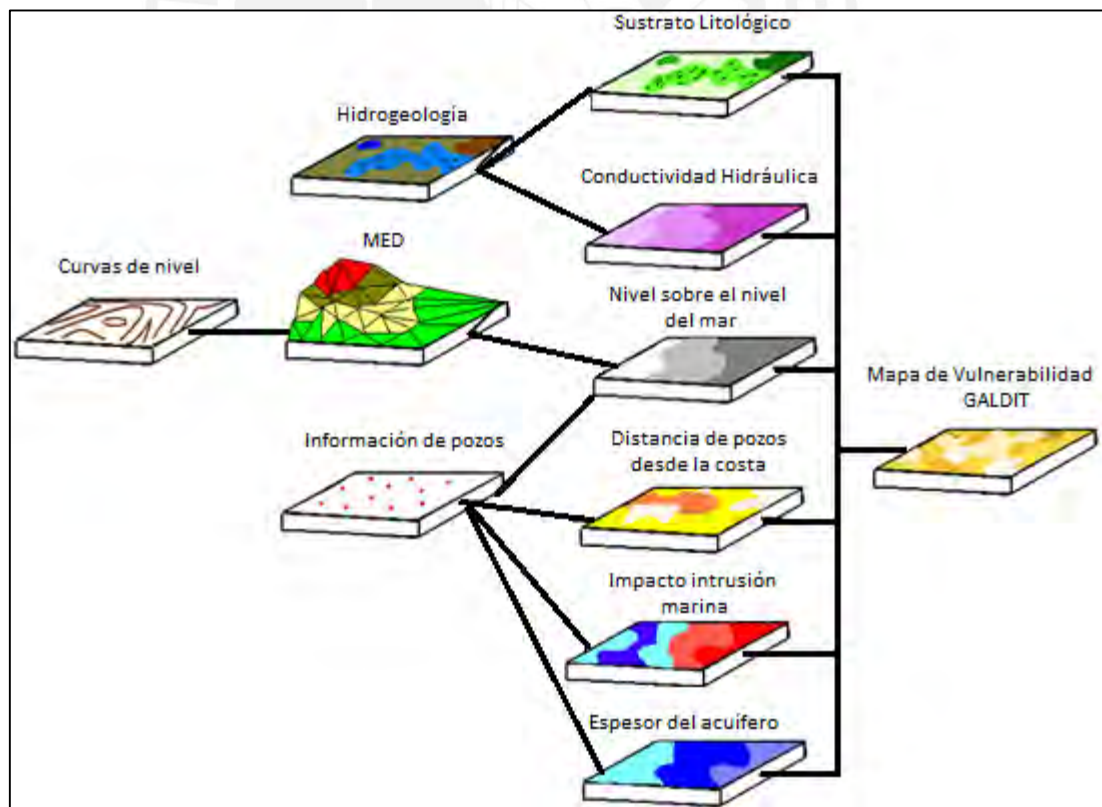


Figura 6: Esquema de mapas para obtener vulnerabilidad con método GALDIT

Fuente: Adaptación de Agüero, V., Pujol, R. (2000)

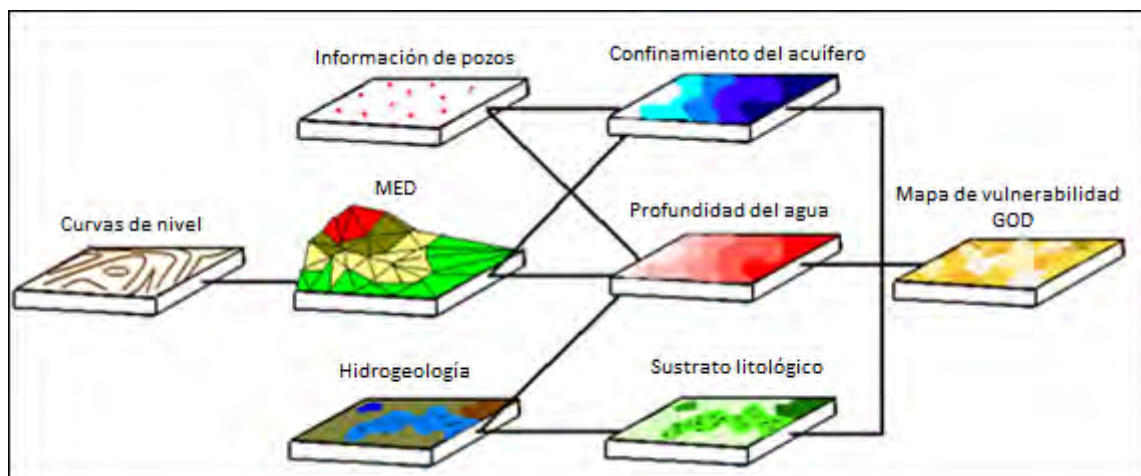


Figura 7: Esquema de mapas para obtener vulnerabilidad con método GOD
Fuente: Agüero, V., Pujol, R., 2000)

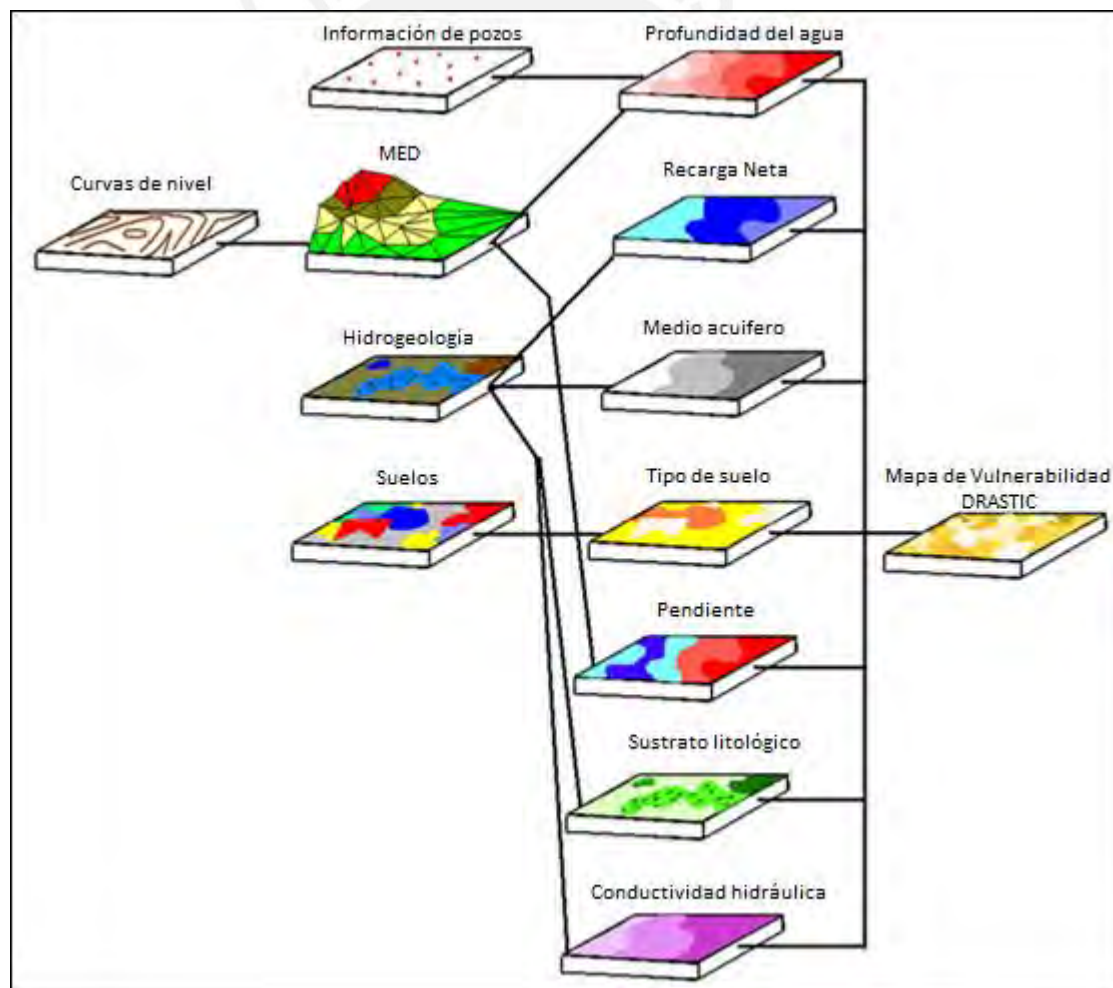


Figura 8: Esquema de mapas para obtener vulnerabilidad con método DRASTIC
Fuente: Agüero, V., Pujol, R., 2000)

CAPITULO 3: METODOLOGÍA Y CÁLCULOS

3.1 Área de estudio

Los distritos de La Yarada y Los Palos (Zona en donde se encuentra los puntos de muestreo de los acuíferos) se encuentra ubicado en la provincia de Tacna proveniente del departamento de Tacna (región del mismo nombre), aproximadamente a unos 35 Km al oeste de la ciudad de Tacna entre las carreteras Costanera Sur, la Panamericana Sur, el Océano Pacífico y la frontera con Chile en el sur.

El área de trabajo de los acuíferos se encuentra comprendido en 5 cuencas, las cuales se darán un mayor enfoque al área que se encuentre dentro del distrito de La Yarada y Los Palos. El área total de las cuencas es de 4214 km², pero el área de mayor importancia es de 1000km² aproximadamente (zona de los distritos de La Yarada y Los Palos), el cual se detalla en la tabla 19. Cabe resaltar que la longitud del área total es 94km de NE a SO, mientras que de NO a SE es de 60km. Como el área de trabajo se encuentra al límite con el mar, el área de trabajo se encuentra desde los cero m.s.n.m., y se llega hasta niveles de 5680 m.s.n.m.; pese a ello, el área en donde se encuentran la mayoría de los acuíferos no pasa de los 750 m.s.n.m.

Tabla 19: Dimensiones de las cuencas de área de estudio

Cuenca	Área (Km ²)	Longitud (Km)	
		NE-SO	NO - SE
Caplina	909	112.8	8.2
Hospicio	1347	88.5	17.2
Intercuenca 13153	507	70.2	11.8
Intercuenca 13155	730	93.8	12.0
Intercuenca 13157	720	81.9	11.3

Fuente: Propia

La delimitación de la zona de trabajo se observa en la figura n°11, el cual está proyectado con las coordenadas UTM WGS84 zona 19s. Se debe tener en cuenta que tales cuencas se han obtenido a partir de la base de datos del MINAM, en donde se tomaron en cuenta todas las cuencas hidrográficas cuya área contenían a las muestras de los pozos.

En la figuras 9 se evidencia la visita a campo, mientras que en la figura 10 se evidencia la reunión con el responsable de la Autoridad Local del Agua de Locumba.



Figura 9: Área de estudio (La Yarada)
Fuente: Propia



Figura 10: Jefe de Autoridad Nacional del Agua - Sede Tacna (Ing. Jaime Iglesias) y Especialista en recursos hídricos (Miguel Ramírez Ruiz)

Fuente: Propia

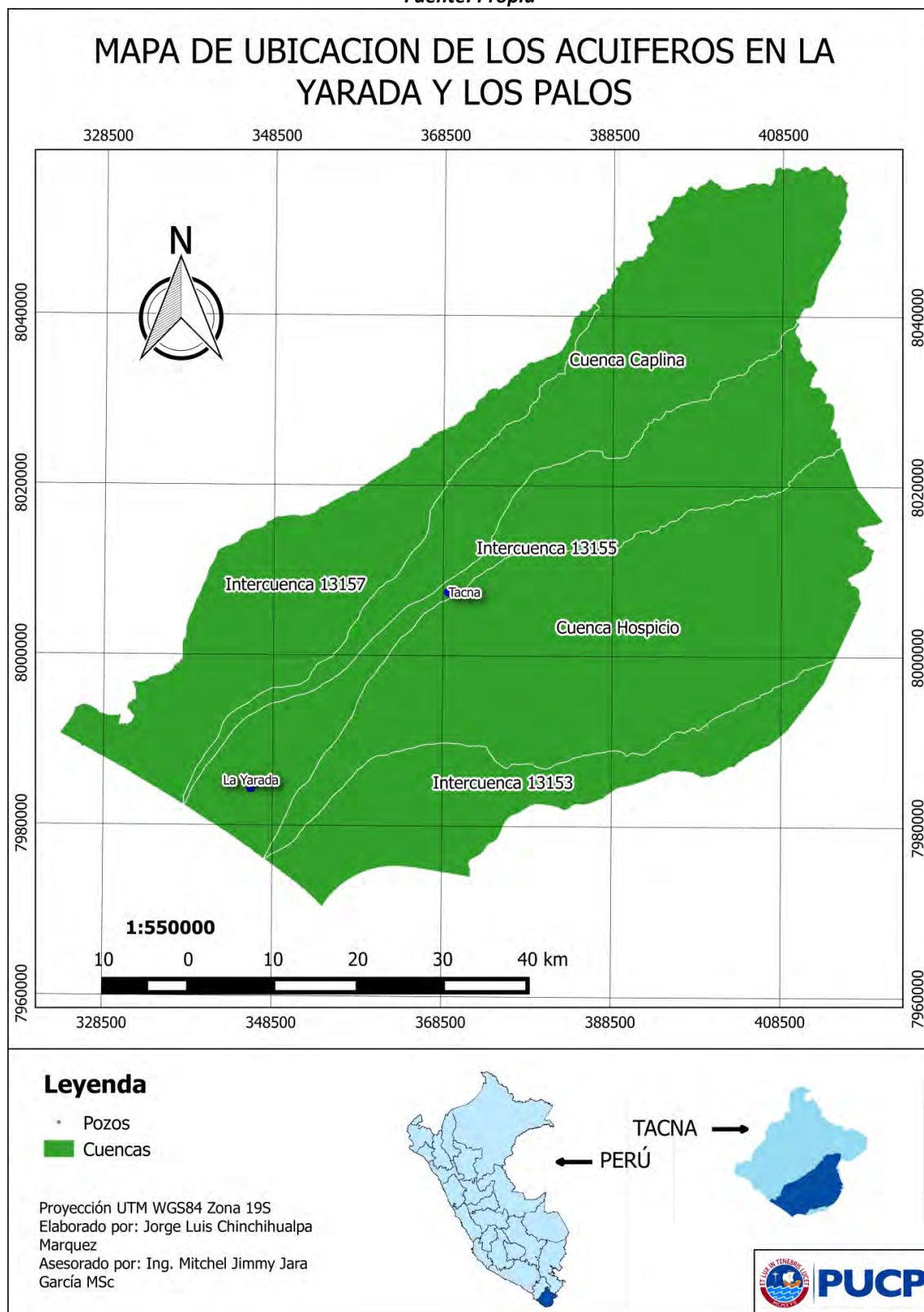


Figura 11: Mapa de Ubicación de área de estudio
Fuente: Propia

3.2 Identificación de contaminantes que intervienen en los acuíferos

Para la identificación de los principales contaminantes del distrito de La Yarada y Los Palos se tomaron en cuenta tanto por las características propias de la región en cuanto a su naturaleza como por las diversas actividades que se realizan en la zona (Actividades agrícolas en especial). Para ello, la forma de obtener estos datos se basan en los muestreos que se deben realizar, en el ensayo, interpretación de información, y por último en la visualización de los resultados, todo esto con la finalidad de identificar en qué regiones del área de estudio hay mayor concentración de una sustancia química, con el fin de comparar y compatibilizar con los mapas de vulnerabilidad de contaminación de los acuíferos ejecutados con los 3 métodos, y de esta manera reconocer el método más aceptable al área de estudio.

Lo primero es reconocer qué sustancias se deben tomar en cuenta. Ante este aspecto, el principal componente a tener en cuenta es la intrusión marina, con lo que es necesario tener valores de porcentaje de salinidad, Cl^{-1} y STD (sólidos Totales Disueltos). Otro aspecto a tener en cuenta es la conductividad eléctrica, el cual es indicador de la calidad del agua estando en función de la temperatura. También es necesario tomar en cuenta el Ph puesto que indica si el agua es ácida, neutra o alcalina. Una sustancia química que indica el grado de descomposición de sustancias orgánicas son los sulfatos (SO_4^{-2}). Por último, tanto los bicarbonatos (HCO_3^{-2}) como los carbonatos (CO_3^{-1}) pueden facilitar si el recurso del agua es el indicado para el riego, puesto que si su valor es mayor a 1000mg/l no sería el recomendable.

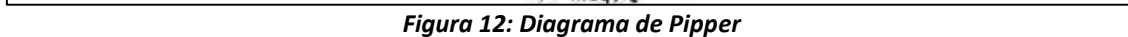
Luego de su identificación es necesario reconocer los valores que tiene cada sustancia química, por lo que su forma de realizarlo es mediante el muestreo, el cual los pozos de los acuíferos del área de estudio vienen a ser los puntos a ser usados para obtener una pequeña muestra. Luego de ello, son ensayados en un laboratorio con el fin de tener las concentraciones de cada sustancia. En las figuras 13 y 14 se observa los puntos de muestreo y el área de estudio cercano al litoral marino.

El diagrama de Piper es una forma de obtener las principales concentraciones hidrogeoquímicas que se obtienen a partir de algunos muestreos realizados en el área de estudio. En el estudio que llevó a cabo La Autoridad Nacional del Agua, el sulfato y/o clorurada, cálcica y/o magnésica fue la familia más predominante tal como se observa en la figura n°12. En la tabla 20 se muestra las concentraciones usadas para el diagrama

Tabla 20: Concentraciones químicas usadas para Diagrama Piper

e	Norte	HCO3	CO3	SO4	Cl	Na	Ca
---	-------	------	-----	-----	----	----	----

Fuente: Autoridad Nacional del Agua, 2009



1. *Chlorophyll a* (Chl *a*)



Figura 13: Pozo IRHS 637 del distrito de La Yarada y Los Palos

Fuente: Propio



Figura 14: Visita a área cercana al mar sin índices de cultivo – intrusión marina – Octubre 2016

Fuente: Propio

3.3 Desarrollo y comparación de los métodos DRASTIC, GOD y GALDIT

3.3.1 Procedimientos metodológicos

En la figura 15 se muestra todo el proceso de recopilación de información que son usados para los 3 métodos (DRASTIC, GOD y GALDIT). La información a obtener se divide en 3 tipos de procesamiento: Datos, imágenes y cartografía. Luego de ello, cada información se usa según su utilidad; es decir, para obtener algunos mapas, se debe interpolar la información que se obtiene a partir de los puntos de muestreo. Otras formas de procesamiento se originan en base a un balance hídrico, uso de bandas de imágenes Landsat o imágenes Aster y mapas cartográficos.

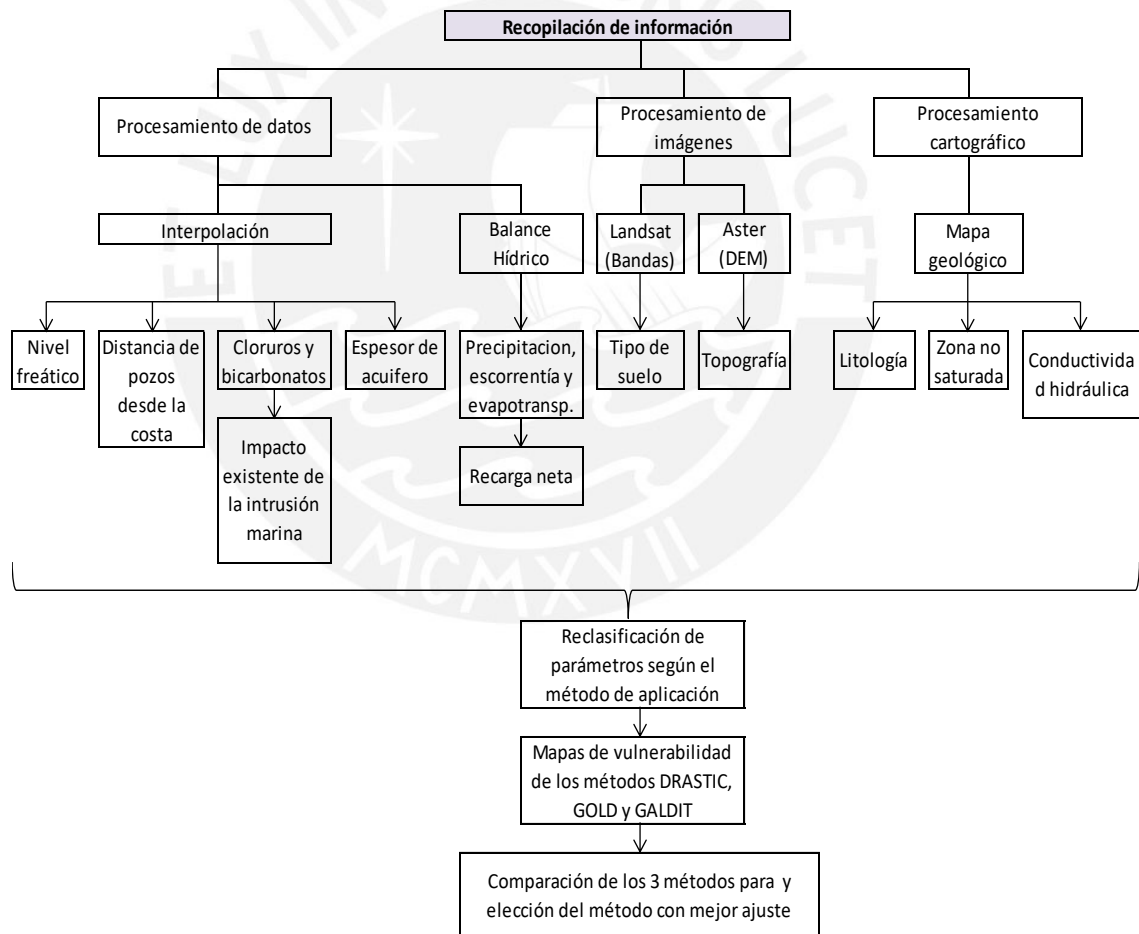


Figura 15: Procedimiento metodológico - Esquema

Fuente: Adaptación tesis (Gutiérrez, 2012)

Es necesario usar los mapas necesarios para cada método en función a los parámetros. Según ello, se realiza la primera reclasificación según las tablas pertinentes a cada método. Para obtener el mapa de vulnerabilidad de contaminación, se realiza otra reclasificación dependiendo de cada método. De esa forma se obtienen los mapas de cada método.

A continuación, se describirá los procesamientos realizados de cada información recopilada, con el fin de obtener los mapas requeridos para los métodos DRASTIC, GOD y GALDIT:

a. Mapa de Nivel freático

Para realizar el mapa de nivel freático, se debe obtener información de los niveles estáticos de las aguas subterráneas. Para ello, se debe tener la lectura de nivel estático de los pozos que se encuentran en el área de estudio. Dicha información se obtiene de La Autoridad Local del Agua de Locumba Sama en Tacna, el cual tiene un registro no mayor a 5 años.

Una vez que los datos fueron recopilados, deben ser debidamente georreferenciados y espacializados. Posteriormente, tales datos usados como puntos de muestreo, deben ser interpolados con el objetivo que se obtenga un resultado en toda el área de estudio, el cual se visualiza en el anexo, figura 2. Para ello se utilizó el método de interpolación Kriging, puesto que este método brindó un mejor ajuste visual e informativo.

Debe tenerse en consideración que la leyenda de la figura 2 de los anexos muestra el rango de valores, en función a intervalos iguales para que se mantenga una generalización, debido a que los 3 métodos usan este parámetro con diferentes rangos de valores.

b. Mapa de Recarga Neta

El flujo de agua que llega entrar a un acuífero se le denomina recarga, el cual se puede obtener mediante el balance hídrico siendo la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía las variables que se usan para un balance en acuíferos.

Para ello, es esencial tener los datos de las precipitaciones promedio mensuales de al menos 10 años; los cuales pueden ser obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) o también de Food And Agriculture Organization of the United

Nations (FAO), puesto que ambas organizaciones pueden brindar esos datos, las cuales se extraen de varias estaciones pluviométricas.

Una vez que los datos se recopilan, son interpolados, y con ello se obtienen líneas de tendencia en función a la máxima altura y la mínima altura de la cuenca como también de las precipitaciones. De esta manera, se tendrá una ecuación para lograr obtener un mapa de precipitaciones

En la tabla 21 se muestra las precipitaciones promedio histórico mensual del fondo de valle, mientras que en la tabla 22 se muestra del punto más alto:



Tabla 21: Precipitaciones promedio histórico mensuales – Fondo de Valle (FAO)

Estación	Coordenadas		Precipitación (mm)											
	Long.	Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Paucarani	-69.76	-17.53	60	79	60	4	0	1	0	1	2	2	19	58
Visviri	-69.48	-17.6	129	67	49	19	1	0	0	0	0	6	10	48
Charana	-69.45	-17.58	100	68	52	15	2	1	0	6	2	8	19	44
Parincota	-69.26	-18.16	100	93	51	9	0	2	1	1	2	1	2	30
Desaguadero	-69	-16.65	161	143	115	33	11	4	4	12	27	24	50	104
Comanche	-68.5	-17	146	116	76	20	7	4	8	13	24	24	41	78
Guaqui	-68.85	-16.58	114	117	59	12	8	7	5	11	38	22	38	74
July	-69.43	-16.2	165	180	139	45	15	5	6	14	39	33	56	120
La Pampilla	-71.5	-16.4	21	28	16	0	0	0	0	2	0	0	1	3
Copacabana	-69.06	-16.15	161	151	131	131	140	33	9	23	55	55	41	176
Arequipa	-71.55	-16.31	199	249	149	5	1	0	0	1	9	2	8	31
Puno	-70	-15.8	143	138	127	36	15	1	2	9	26	30	44	106
Vitor	-71.8	-16.45	7	8	2	1	0	0	0	0	1	0	0	1
Viacha	-68.28	-16.63	130	113	76	38	12	2	6	17	37	34	55	104
Patacamaya	-67.91	-17.2	88	69	47	15	8	2	1	9	37	18	33	76
Kollataka	-68.33	-16.51	148	124	83	32	17	5	2	8	20	26	52	150
Imata	-71.05	-15.8	130	129	105	27	8	2	2	5	12	13	32	81
Capachica	-69.83	-15.63	129	159	169	63	24	2	4	4	35	22	66	137

Fuente: FAO

Tabla 22: Precipitaciones promedio histórico mensuales – Alto de Valle (FAO)

Estación	Coordenadas		Precipitación (mm)											
	Long.	Latitud	Ene.	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PAUCARANI	69.76	-17.53	60	79	60	4	0	1	0	1	2	2	19	58
VISVIRI	69.48	-17.60	129	67	49	19	1	0	0	0	0	6	10	48
CHARANA	69.45	-17.58	100	68	52	15	2	1	0	6	2	8	19	44
PARINCOTA	69.26	-18.16	100	93	51	9	0	2	1	1	2	1	2	30

Fuente: FAO

En cuanto a la evapotranspiración se aplican las ecuaciones del (5) al (8) dadas por el método de Thornthwaite:

$$EPT = 1.6 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad \dots (5)$$

Donde: EPT = Evapotranspiración potencial mensual (mm/mes)

T = Temperatura media mensual (°C)

I = Índice de calor anual

a = Coeficiente experimental de ajuste

Respecto al índice de calor anual, se calcula a partir de los índices de calor mensual de cada mes de la siguiente manera:

$$I = \sum_{n=1}^{12} i = \sum_{n=1}^{12} T/5^{1.514} \quad \dots (6)$$

Donde: i = índice de calor mensual

T = Temperatura media mensual (°C)

Además, el coeficiente experimental de ajuste se obtiene de la siguiente ecuación:

$$a = (675 \cdot 10^{-9})I^3 - (771 \cdot 10^{-7})I^2 - (1972 \cdot 10^{-5})I + 0,4924 \quad \dots (7)$$

Por último se hace un ajuste multiplicando ETP con su respectivo factor de corrección denominado índice de iluminación mensual (F):

$$F = N/12 - d/30 - d \quad \dots (8)$$

Donde: N = n° máximo de horas de sol según la latitud del lugar

d = n° de días del mes en cuestión

Al igual que en el caso de las precipitaciones, es primordial tener los datos de las temperaturas medias mensuales (°C) de al menos 10 años. Para ello, estos datos pueden ser recolectados tanto de SENAMHI o de la FAO. En la tabla 23 se muestran las temperaturas históricas mensuales del fondo de valle, y en la tabla 24 del alto de valle.

Tabla 23: Temperatura medias históricas mensuales – Fondo de Valle (FAO)

Estación	Coordenadas		Temperatura (°C)											
	Long.	Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Paucarani	-69.76	-17.53	4.1	4.2	3.6	2.1	0.4	-1.6	-1.2	-0.5	0.8	1.5	2.2	3.3
Visviri	-69.48	-17.6	10.4	9.9	9.6	8.8	6.7	4.3	4.3	5.4	7.5	9.4	10.6	10.8
Charana	-69.45	-17.58	10.6	10.1	9.8	8.8	6.7	4.8	4.2	5.4	7.7	9.6	11	11.3
Parincota	-69.26	-18.16	5.1	5.1	4.5	3.2	1.1	-1.2	-1.4	-0.6	1.3	2.7	4	4.7
Desaguadero	-69	-16.65	10.3	10.5	10.2	8.8	6.6	4.2	3.6	4.9	7.4	8.7	9.6	10
Guaqui	-68.85	-16.58	8.8	9.4	8.9	7.5	5.9	4.5	4.4	5.1	7.5	8.2	10.2	9.8
July	-69.43	-16.2	9.4	9.2	9.1	8.6	7.6	6.5	6.3	6.9	8.2	9.4	9.7	9.6
Copacabana	-69.06	-16.15	12	13	12.4	10.4	10	8.8	9	9.8	10.8	13.2	13.5	13.7
Arequipa	-71.55	-16.31	15.6	15.1	15.2	15.2	14.8	14.1	14.2	14.5	15.3	15.8	15.8	15.9
Puno	-70	-15.8	9.6	10.6	8.8	8.4	7.9	6.3	6.2	6.1	6.3	9.7	9.6	9.4
Vitor	-71.8	-16.45	17.9	18.1	18.4	18	17.9	17.3	17.1	17.4	18	18	18	18.2
Viacha	-68.28	-16.63	9.6	9.7	8.8	7.7	5.5	3.1	2.8	4.6	7	8.3	9	9
Viscachanti	-67.93	-17.18	11.3	12.5	11.7	9.4	7.3	4.4	5.3	6.2	8.1	9.9	11.1	11.6
Patacamaya	-67.91	-17.2	14.7	14.6	13.6	11.2	7.9	5	5.4	7.6	10.7	13.5	15.2	14.8
Kollataka	-68.33	-16.51	11.5	11.1	10.1	8.2	5.4	3.6	3.8	5	7.7	10.5	11.6	11.8
Imata	-71.05	-15.8	5.2	5.7	5.3	4	1.7	0.2	-0.3	0.3	1.8	3.3	3.6	4.7
Capachica	-69.83	-15.63	8.7	8.6	8.5	8.1	7	5.8	4.9	6.1	7.3	8.4	8.5	8.1
Villa Aroma	-67.71	-17.43	8.4	8.2	8.7	5.9	4	2.7	1.9	6.5	6.4	7	7	7.3

Fuente: FAO

Tabla 24: Temperatura medias históricas mensuales – Tope de Valle (FAO)

Estación	Coordenadas		Temperatura (°C)											
	Long.	Latitud	Ene.	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Paucarani	69.76	-17.53	4.1	4.2	3.6	2.1	0.4	-1.6	-1.2	-0.5	0.8	1.5	2.2	3.3
Visviri	69.48	-17.60	10.4	9.9	9.6	8.8	6.7	4.3	4.3	5.4	7.5	9.4	10.6	10.8
Charana	69.45	-17.58	10.6	10.1	9.8	8.8	6.7	4.8	4.2	5.4	7.7	9.6	11	11.3
Parincota	69.26	-18.16	5.1	5.1	4.5	3.2	1.1	-1.2	-1.4	-0.6	1.3	2.7	4	4.7

Fuente: FAO

Estos datos recopilados de las tablas 21 al 24 se utilizan para generar líneas de tendencia, y así obtener la evapotranspiración potencial. Luego de ello se calcula la evapotranspiración real tomando en cuenta el coeficiente de cultivo mostrado en la ecuación (9):

$$EPT_{real} = Kc * EPT_{potencial} \quad \dots (9)$$

Donde: EPT_{real} = Evapotranspiración real mensual (mm/mes)

Kc = Coeficiente de cultivo

ETP = Evapotranspiración potencial mensual (mm/mes)

El coeficiente de cultivo se obtuvo a partir del tipo de cosecha, además se consideró la temporada en el que se encuentra el cultivo. Para ello, se tomó en cuenta el olivo siendo su temporada de cosecha de octubre hasta fines de febrero. Según los datos que ofrece la FAO, los coeficientes de cultivo varían dependiendo de la temporada (IGP, 2015), por lo que de octubre a febrero se consideró un valor de 0.65, mientras que para los meses que quedan un valor de 0.6. Estos valores fueron calculados por la FAO, el cual son valores típicos mostrados en la tabla 25.

Para el caso de la escorrentía, se puede obtener mediante el Coeficiente de escorrentía C siguiendo los requisitos que ofrece la tabla 25 en el que se toma en cuenta el tipo de cobertura, pendiente y permeabilidad del suelo. Para el coeficiente de escorrentía se consideró que el área de estudio es semipermeable, en donde hay zonas sin vegetación y con vegetación, además de que el mapa de pendientes muestra que el área de estudio está entre 1% y 5%. Es así que, el valor obtenido fue de 0.5. Por último, los valores sombreados de la tabla n°25 son los más parecidos al área de estudio.

Tabla 25: Coeficientes de Escorrentía

COBERTURA DEL SUELO	TIPO DE SUELO	PENDIENTE (%)				
		> 50	20-50	may-20	01-may	0-1
Sin vegetación	Impermeable	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
	Semipermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Permeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
Cultivos	Impermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Semipermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Permeable	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
	Semipermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Permeable	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15
Hierba	Impermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Semipermeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
	Permeable	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10
Bosque, vegetación densa	Impermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Semipermeable	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25
	Permeable	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05

Fuente: (Benítez et al, 1980)

Las pendientes fueron obtenidas a partir del mapa de DEM del área de estudio, el cual es un mapa requerido para el desarrollo del método DRASTIC y GOD. En cuanto a la cobertura vegetal, un visualizador satelital como es Google Earth y la ayuda de SAS.Planet se puede generar un atributo a cada zona con características comunes. Por último, la permeabilidad del suelo se puede obtener del mapa de textura de suelo; el cual, también es un parámetro del método DRASTIC.

Con los resultados de la precipitación, evapotranspiración real y la escorrentía se puede realizar el balance hídrico, y así, la recarga del acuífero a través de la ecuación (10):

$$\text{Recarga} = \text{Precipitación} - (\text{Evapotranspiración real} + \text{Escorrentía}) \quad \dots (10)$$

Tanto en la tabla 26 como en la 27 se realizan los cálculos para obtener la recarga en el fondo y tope de valle. Para ello, se relacionan la precipitación, coeficiente de escorrentía y la evapotranspiración

Tabla 26: Resumen Recarga Neta – Fondo de Valle (FAO)

Elev.	Mes	Precipit - Pre (mm)	Evapotransp. - Eptp (mm)	kc	Evapotransp. - Eptr (mm)	Exc. hídrico SI(Pre>Ept,Pre- Ept,0)	Recarga Exc. * 0.5
63.62	Ene	0	131.5	0.65	85.48	0.00	0
	Feb	2.99	113.68	0.65	73.89	0.00	0
	Mar	0	122.11	0.70	85.48	0.00	0
	Abr	0	109.51	0.70	76.66	0.00	0
	May	0	101.01	0.70	70.71	0.00	0
	Jun	0	85.38	0.70	59.77	0.00	0
	Jul	0	106.14	0.70	74.30	0.00	0
	Ago	0	126.25	0.70	88.38	0.00	0
	Sep	0.28	138.34	0.70	96.84	0.00	0
	Oct	0	147.94	0.65	96.16	0.00	0
	Nov	0	142.25	0.65	92.46	0.00	0
	Dic	0	154.67	0.65	100.54	0.00	0
	Sum:	3.27	1478.78		1000.644	0.00	0

Fuente: Propio

Tabla 27: Resumen Recarga Neta – Tope de Valle (FAO)

Elev.	Mes	Precipit. - Pre	Evapotransp. - Eptp (mm)	kc	Evapotransp. - Eptr (mm)	Exc. hídrico Si(Pre>Ept,Pre- Ept,0)	Recarga Exc. * 0.5
5504	Ene	3.11	22.33	0.65	14.51	0.00	0
	Feb	90.63	12.39	0.65	8.05	82.58	41.29
	Mar	67.88	16.39	0.70	11.47	56.41	28.20
	Abr	0	17.92	0.70	12.54	0.00	0
	May	0.45	14.54	0.70	10.18	0.00	0
	Jun	0.37	0	0.70	0.00	0.37	0.19
	Jul	0.81	0	0.70	0.00	0.81	0.41
	Ago	0.91	0	0.70	0.00	0.91	0.46
	Sep	2.13	4.55	0.70	3.19	0.00	0
	Oct	1.54	12.5	0.65	8.13	0.00	0
	Nov	1.98	7.95	0.65	5.17	0.00	0
	Dic	2.66	11.67	0.65	7.59	0.00	0
	Sum:	172.47	120.24		80.826	91.64	70.54

Fuente: Propio

En la figura 16 se muestra un gráfico de ecuaciones de las variables para obtener la recarga neta. Para ello es fundamental conocer las alturas del fondo y tope de valle. Considerar que todas las ecuaciones están en función a la elevación, el cual se aplica a un mapa de modelo de elevación digital mostrado en la figura 5 del anexo. Para ello, se utilizan las imágenes Aster. En la figura 3 de los anexos se observa el resultado del mapa de recarga neta

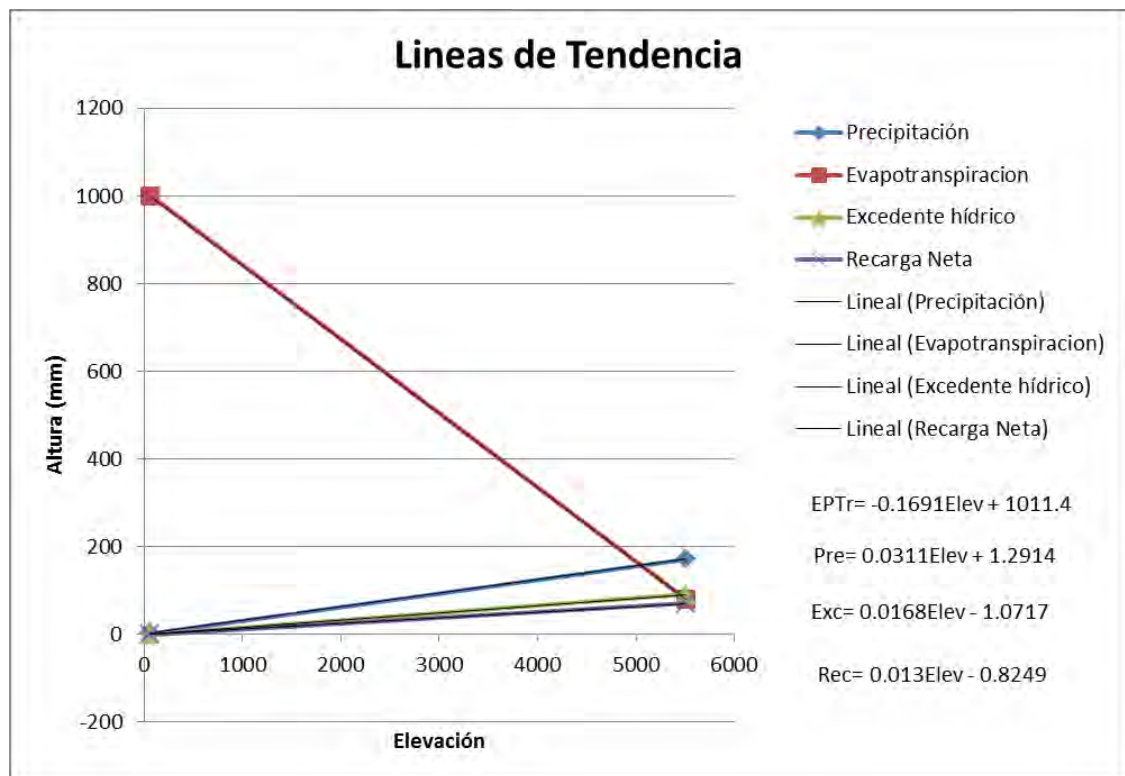


Figura 16: Líneas de Tendencia – Recarga Neta
Fuente: Propio

c. Mapa de tipo de suelos

Para determinar el tipo de suelo, existen diversas formas de obtenerlas. Una de ellas es mediante la estratigrafía de los piezómetros y el otro método son con las imágenes Landsat, el cual se caracteriza por usar sensores remotos. Para ello se tomaron en cuenta las imágenes Landsat 7 ETM+ del 30 de noviembre del 2002, debido a la cantidad de bandas que proporciona, el cual permite combinarse entre ellas con el fin de obtener distintas variaciones de color y procesamiento de datos.

En la figura 17 se observa la banda 1 de las imágenes Landsat 7 TM+, el cual muestra la ubicación del área de estudio.

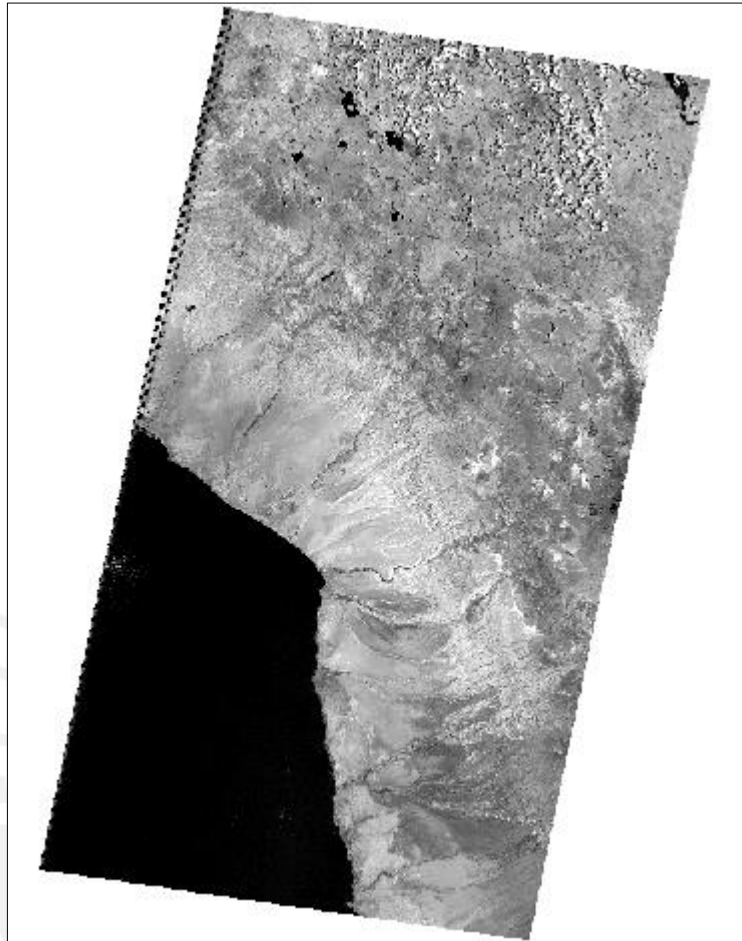


Figura 17: Banda1 de imagen Landsat 7 TM+
Fuente: <http://earthexplorer.usgs.gov/>

Existe una relación entre la reflectancia y el tamaño de la partícula, lo que permite clasificar la partícula de una manera más práctica. Mientras más grande es la reflectancia, será menor el tamaño de la partícula, y de forma opuesta sucederá con la disminución de la reflectancia. Con ello, es posible clasificar el suelo en limos, arenas y arcilla, y para ello existen ecuaciones de regresión lineal que fueron propuestas para obtener las propiedades de la superficie del suelo (Auza, 2011). En la ecuación (11) se muestra el contenido de limo, mientras que la ecuación (12) es el contenido de arena.

$$\text{Contenido de limo (\%)} = 157.14 + 44.89 * \text{banda1} + 9.95 * \text{banda4} - 249.62 * \text{banda7} \quad \dots(11)$$

$$\text{Contenido de arena (\%)} = 90.87 - 22.51 * \text{banda2} + 17.49 * \text{banda3} - 127.41 * \text{banda7} \quad \dots(12)$$

Por último, para determinar el contenido de arcilla se tomó en cuenta el triángulo textural realizado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). En la figura 18 se visualiza el triángulo textural.

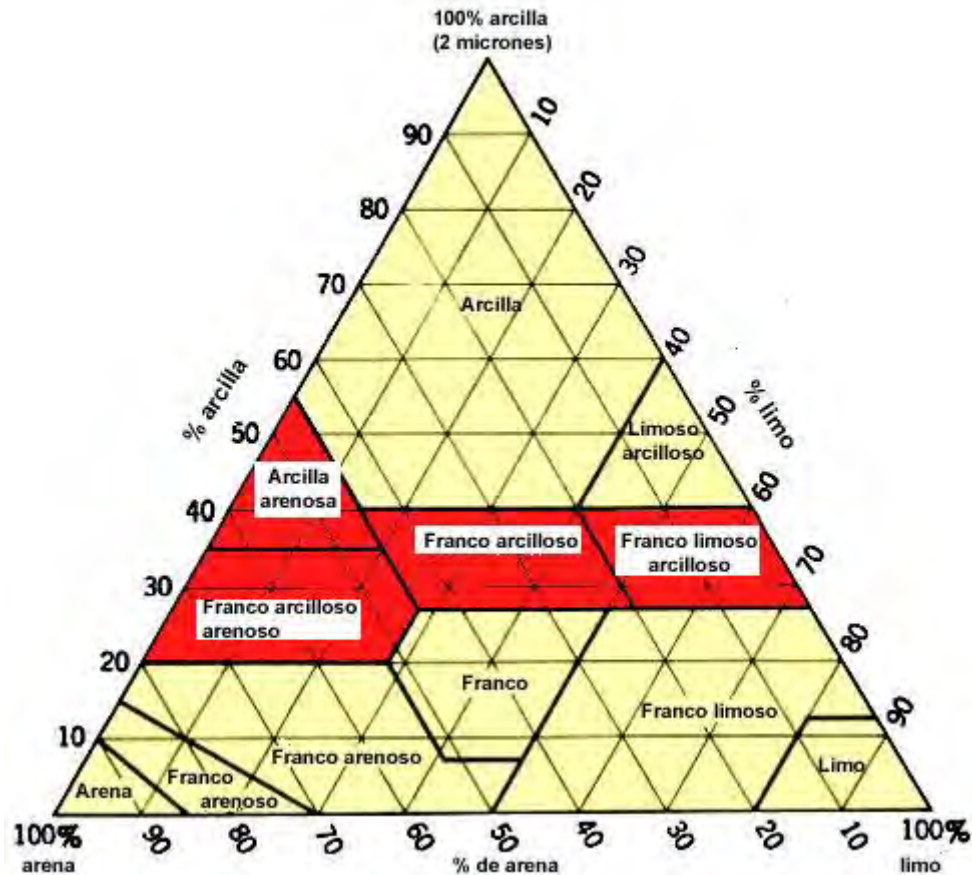


Figura 18: Triángulo textural para determinar el porcentaje de arcilla
Fuente: USDA

El mapa de tipo de suelo se observa en la figura 4 de los anexos, el cual se procesa en función a las ecuaciones de contenido de limo y arena, además del uso de cada banda que requiera la ecuación.

d. Mapa de Pendiente de Suelo

El mapa de pendiente del suelo se realizó a partir del DEM, Digital Elevation Model V002, del sensor ASTER Global (ASTGTM) cuya resolución es de 30x30m; el cual es originario de los satélites de la NASA (página web de NASA: <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>). Para ello, se sabe que la localización del área de trabajo se encuentra en la zona 19s. Tomando en cuenta estos datos, se utilizaron las imágenes ASTGTM2_S19W070_dem y ASTGTM2_S19W071_dem para obtener las elevaciones del área de toda la cuenca.

Una vez obtenido el mapa de elevación de la cuenca, se procede a obtener el mapa de pendientes; el cual, se visualiza en la figura 6 de los anexos.

e. Mapa de Litología del acuífero

La forma de obtener el mapa de litología del acuífero es mediante los mapas geológicos, el cual se obtuvieron a través del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Para ello, se digitalizaron las cartas geológicas 36u, 36v, 36x, 37u, 37v y 37x. La representación del mapa geológico se muestra en la figura 7 de los anexos.

f. Mapa de Naturaleza de la zona no saturada

Para generar el mapa de naturaleza de la zona no saturada se tomó como base el mapa geológico, debido a que tanto en la superficie como en la zona no saturada deben presentar características muy similares. Entonces, si en la superficie hay presencia de basaltos, entonces en la zona no saturada habrá ese mismo sedimento, al menos en los primeros metros de profundidad. El mapa de naturaleza de la zona no saturada se presenta en la figura 8 de los anexos.

g. Mapa de Conductividad hidráulica

El mapa de conductividad hidráulica se puede obtener de 2 maneras. Una de ellas es mediante ensayos de permeabilidad realizados en campo, y la otra forma es mediante la utilización del mapa geológico y a través de valores tabulados según la litología que corresponda. La tabla 28 muestra la forma de obtener el valor de conductividad hidráulica para el área de estudio. La figura 9 de los anexos muestra el resultado del mapa de conductividad hidráulica.

Tabla 28: Valores de conductividad hidráulica

Permeabilidad relativa	Permeabilidad				Semi-Permeable				Muy poco permeable				
Arena o grava no consolidada	Grava continua o		Arena continua o mixta		Arena fina, cieno, Loess, loam								
Arcilla no consolidad y materia					Turba		Estrato arcilloso		Arcilla expansiva				
Roca consolidada	Rocas muy fracturadas				Roca petrolífera			Piedra arenisca	Roca sedimentaria , dolomita		Granito		
k (cm/s)	10^-2	10^-1	1	10^-1	10^-2	10^-3	10^-4	10^-5	10^-6	10^-7	10^-8	10^-9	10^-10

Fuente: Cortes, 2012

h. Mapa de Distancia de la Costa hacia el interior

Para obtener este mapa se debe tener la información de las coordenadas de los pozos usados como puntos de muestreo que hay en el área de estudio, y también debe usarse la línea de la marea como indicador que es el límite entre el mar y la costa. Luego de ello, la distancia del pozo a tal línea (perpendicular) es el atributo principal para proceder una interpolación, el cual se vio conveniente utilizar el método de Kriging, puesto que fue el método que dio una mejor precisión. Este mapa se representa en la figura 10 de los anexos.

i. Mapa de Impacto existente de la intrusión marina

El mapa de impacto existente de la intrusión marina en el área, depende de los valores recopilados en campo, los cuales son las concentraciones de sustancias químicas Cloruro (Cl^{-1}), Bicarbonato (HCO_3^{-2}) y Carbonato (CO_3^{-1}). Estos datos fueron obtenidos a través de la Autoridad Nacional del Agua (administración Local del Agua Caplina Locumba) por medio de su informe de caracterización del acuífero de Caplina. Luego que se obtuvieron estos valores, fue necesario realizar una interpolación de los puntos de muestreo de los pozos que corresponden al área de estudio, los cuales se usaron las metodologías Spline e IDW. Con la interpolación realizada, además de su reclasificación teniendo en cuenta la tabla n°15, se genera el mapa de impacto existente de la intrusión marina. Su representación se muestra en la figura 13 de los anexos.

j. Mapa de espesor del acuífero

Este mapa se obtiene a partir de la recopilación de información hidrogeológica de los pozos de acuíferos que se obtuvieron de La Autoridad Nacional del Agua (administración Local del Agua Caplina Locumba). Para ello, se georreferenciaron los puntos de pozos, para luego ser interpolados mediante el método Kriging. El mapa de espesor de acuíferos se visualiza en la figura 14 de los anexos. La tabla 29 especifica los anchos de las diversas zonas del acuífero de La Caplina:

Tabla 29: Espesores de acuífero

Zona	Sector	Espesor (m)
1	Miculla – Huaycuyo	356
1	Peligro – Velásquez	357
1	Qda. Cubani – Pocollay (Sobraya)	342.5
1	Pampa Colorada – Viñani	234
1	Para – Irrigación Magollo	216
2	Para Grande – La Yarada	247.5
2	Pampa de la Yarada	182.5
2	8 de Diciembre – Copare	361.5
2	Asentamiento 4 – Asentamiento 3	286
2	Asentamiento 2 – Asentamiento 5 y 6	280.5
2	AA. HH. Pachacutec y zona Z	259
2	La Garita	208.5
2	Qda. Las Salinas	364
2	Qda. Cauñani	168.5
3	La Esperanza – Fdo. Valdivia	181
3	Boca del río – Yarada Antigua	282.5
3	Yarada Baja – Los Olivos	233.5
3	Fdo. Virgen de Chapi – Yarada Media	235
3	Rancho Grande	317
4	Asoc.Agr. P. Posible – Frontera del Sur	288.5
4	La Curva – Los Macheros	318.5
4	Los Palos – Los Cenizales	319.5
4	Santa Rosa – Complejo Aduanero	256.5

Fuente: Autoridad Nacional del Agua, 2009

3.3.2 Aplicación de los métodos DRASTIC, GOLD y GALDIT

Reclasificación Método DRASTIC:

Como se explicó en el capítulo anterior, todos los mapas para el método DRASTIC se obtienen del procesamiento de datos, imágenes y cartográfico.

Para el caso del parámetro D, los mapas de nivel freático y topografía son necesarios utilizarlos mediante la diferencia entre ellos. El parámetro R se logra obtener realizando un balance hídrico. Estos 2 parámetros necesitan de un procesamiento de datos, el cual se interpolan los puntos de muestreo del área de trabajo.

Para el caso del parámetro S, se usan las imágenes Landsat. El uso de las bandas permiten obtener una relación entre el tamaño d partículas y el porcentaje de limo y arena. Gracias a ello se puede obtener el mapa de tipo de suelo. A diferencia del parámetro S, el T usa imágenes Aster, el cual la obtención del mapa topográfico es directo al tener el mapa de elevación digital. Estos 2 parámetros usan un procesamiento de imágenes.

Tanto el parámetro A como el I usan el mapa de zona no saturada, debido a que la formación geológica en la superficie como en la parte interna del acuífero es el mismo. La única diferencia entre estos parámetros es la clasificación que se le da para cada tipo de litología. Para el parámetro C, también se usa el mapa geológico para poder clasificar cada litología que representa cada área del mapa. Estos 3 parámetros usan un procesamiento cartográfico.

Al tener todos estos mapas, cada uno de ellos debe reclasificarse según la valoración de cada parámetro, el cual está representado en las tablas del 1 al 7. Posteriormente cada uno de los mapas es reclasificado, según el factor de ponderación que se establece para cada parámetro mostrado en la tabla 8. La sumatoria de estos mapas reclasificados da como resultado el mapa DRASTIC.

Por último, la última reclasificación se da en función al grado de vulnerabilidad que se representa en el mapa DRASTIC, el cual se muestra en la tabla 9. De esta manera se obtiene el mapa de vulnerabilidad usando el método DRASTIC. El proceso de obtención del mapa con el método DRASTIC se muestra en la figura 19.

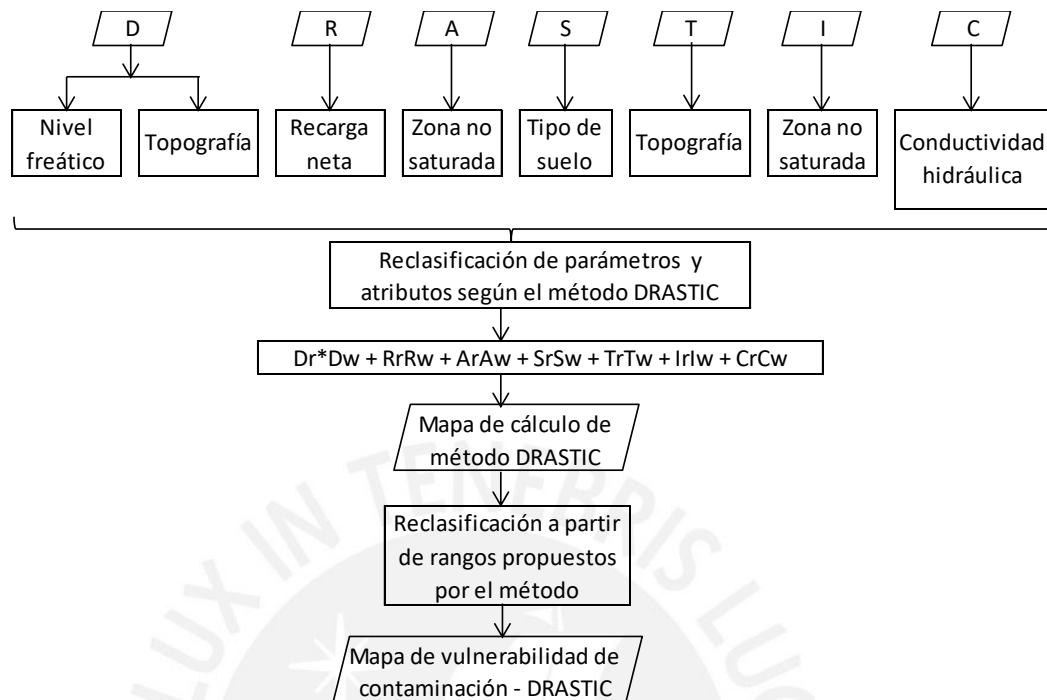


Figura 19: Aplicación del método DRASTIC

Fuente: Adaptado de Gutiérrez (2012)

Reclasificación Método GOD:

Como se explicó en el capítulo anterior, todos los mapas para el método GOD se obtienen tanto del procesamiento de datos como cartográfico.

Para el caso del parámetro D, el mapa de nivel freático necesita de un procesamiento de datos, el cual se interpolan los puntos de muestreo del área de trabajo.

Tanto el parámetro G como el O usan el mapa de litología, debido a que los 2 parámetros necesitan la información de la formación geológica. A partir de la geología se puede clasificar las zonas en función al confinamiento. Con la geología se conoce la litología de los estratos. Estos 2 parámetros usaron un procesamiento cartográfico.

Al tener todos estos mapas, cada uno de ellos debe reclasificarse según la valoración de cada parámetro, el cual está representado en la figura 4. Posteriormente, los 3 mapas se multiplican como en la ecuación (3). La multiplicación de estos mapas reclasificados da como resultado el mapa GOD.

Por último, la última reclasificación se da en función al grado de vulnerabilidad que se representa en el mapa GOD, el cual se muestra en la figura 4. De esta manera se obtiene

el mapa de vulnerabilidad usando el método GOD. El proceso de obtención del mapa con el método GOD se muestra en la figura 20.

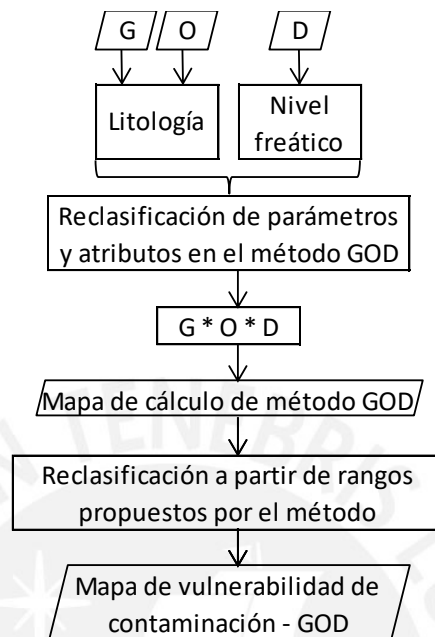


Figura 20: Aplicación del método GOD
Fuente: Adaptado de Gutiérrez (2012)

Reclasificación Método GALDIT:

Como se explicó en el capítulo anterior, todos los mapas para el método GALDIT se obtienen del procesamiento de datos y cartográfico.

Para el parámetro G se usa el mapa de litología, debido a que la formación geológica permite obtener el confinamiento de los acuíferos. Para el parámetro A, también se usa el mapa geológico para poder clasificar cada litología que representa cada área del mapa. De esa manera y usando la tabla 28 se puede obtener la conductividad hidráulica. Estos 2 parámetros usaron un procesamiento cartográfico.

Para el caso del parámetro L, el mapa de nivel freático es necesario para conseguir el nivel sobre el nivel del mar en función a la altura del acuífero. El parámetro D se obtiene de la distancia de los puntos de muestro al litoral marino. El parámetro I utiliza los muestreos de Cl^- , HCO_3^{1-} y CO_3^{2-} . Es necesario que cada sustancia tenga su propio mapa interpolado de sus respectivos puntos de muestreo. Luego, son unidos a través de la siguiente forma: $\text{Cl}^- / [\text{HCO}_3^{1-} + \text{CO}_3^{2-}]$, el cual se representa con un solo mapa. El

parámetro T representa el espesor de acuíferos en el que la tabla 29 muestra los valores de espesores en función a zonas. Este parámetro brinda un mapa, el cual divide las áreas según las zonas de cada sector. Estos 4 parámetros necesitan de un procesamiento de datos, el cual se interpolan los puntos de muestreo del área de trabajo.

Al tener todos estos mapas, cada uno de ellos debe reclasificarse según la valoración de cada parámetro, el cual está representado en las tablas del 11 al 16. Posteriormente cada uno de los mapas es reclasificado, según el factor de ponderación que se establece para cada parámetro mostrado en la tabla 17. Ahora tener en cuenta que los mapas reclasificados y ponderados se deben sumar entre todos los parámetros, luego se divide con la sumatoria de todos los mapas ponderados tal como se muestra en la ecuación (4). De esa forma se obtiene el mapa GALDIT

Por último, la última reclasificación se da en función al grado de vulnerabilidad que se representa en el mapa GALDIT, el cual se muestra en la tabla 18. De esta manera se obtiene el mapa de vulnerabilidad usando el método GALDIT. El proceso de obtención del mapa con el método GALDIT se muestra en la figura 21.

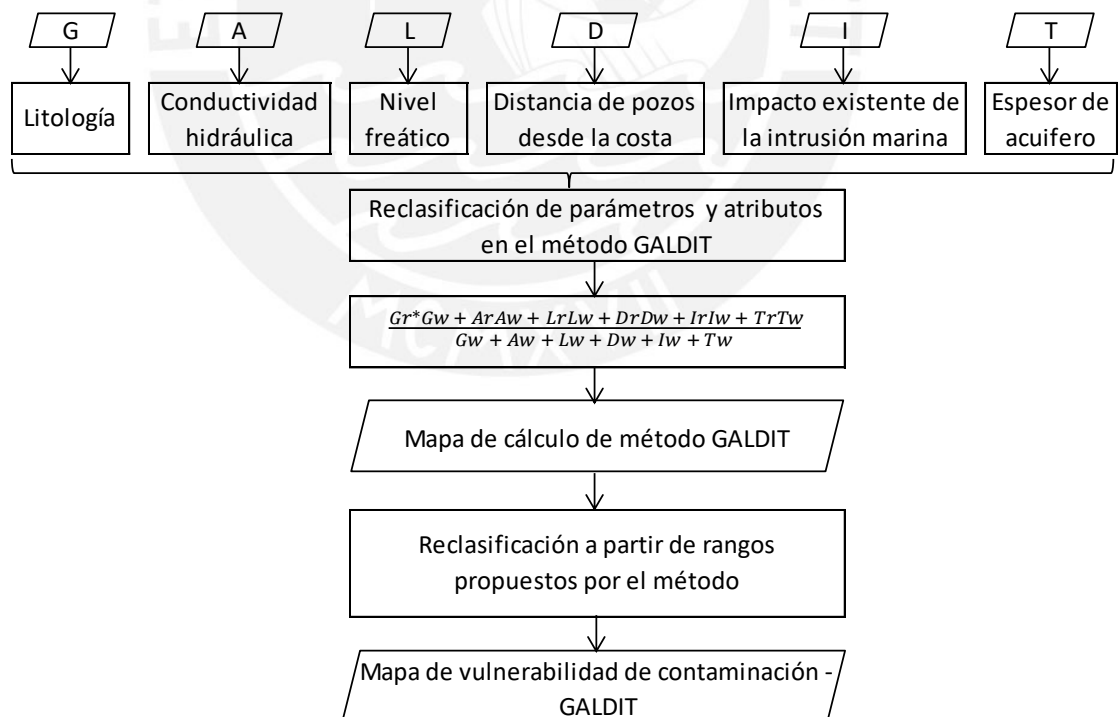
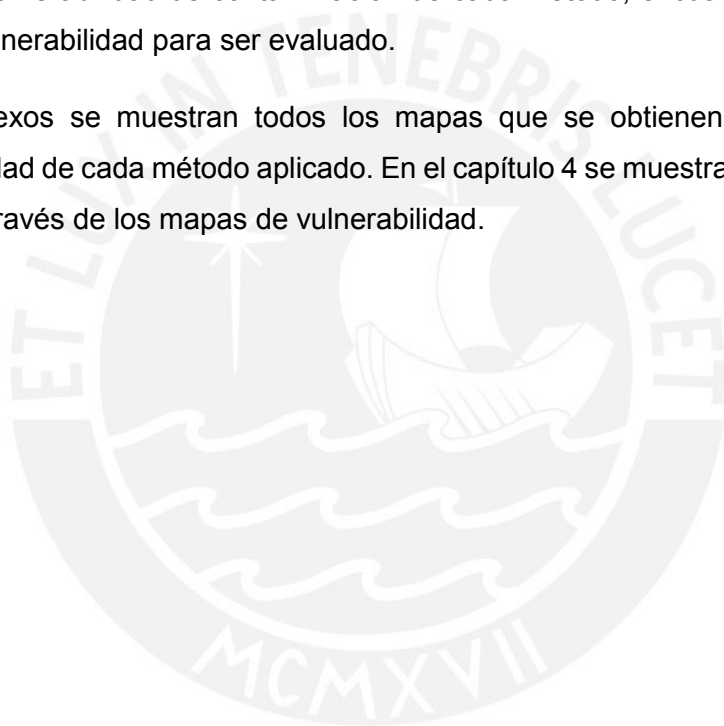


Figura 21: Aplicación del método GALDIT
Fuente: Adaptado de Gutiérrez (2012)

Un factor a tener en cuenta es que los datos del mapa de litología fueron utilizados para tener una clasificación del acuífero según su confinamiento tanto para el método GOD como para el método GALDIT, puesto que este parámetro brinda información necesaria para poder determinar el tipo de acuífero. Para todos los demás parámetros se especifican sus respectivos mapas a utilizar, el cual, posteriormente se le da su respectivo atributo, valoración y reclasificación, según lo que el método lo requiera. Luego, se realiza su cálculo mediante la ecuación propuesta por cada método de vulnerabilidad. Una vez obtenida tal mapa se procede a reclasificar dicho mapa para que se relacione con los rangos especificados por cada método. Por último se obtiene el mapa de vulnerabilidad de contaminación de cada método, el cual cada área indica un nivel de vulnerabilidad para ser evaluado.

En los anexos se muestran todos los mapas que se obtienen previo al mapa de vulnerabilidad de cada método aplicado. En el capítulo 4 se muestra el resultado de cada método a través de los mapas de vulnerabilidad.



CAPITULO 4: DISCUSIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Vulnerabilidad del método DRASTIC

Del mapa de vulnerabilidad mediante el método DRASTIC, mostrado en la figura 23, se obtiene una susceptibilidad a la calidad del agua en un rango de muy bajo (48%) a moderado (38%) siendo en su mayoría muy bajo, todo ello mostrado en la figura 22. En cuanto a la zona de La Yarada y Los Palos, se encuentra en moderado (área cercana al litoral marino).

El nivel moderado se debe en su mayoría a su litología puesto que la poca permeabilidad (grava arena y limo de tobas retrabajadas) hace que cualquier contaminante pueda ingresar de manera escasa a los acuíferos. La geología de casi toda la zona de La Yarada y Los Palos es la misma, por lo que llegan a ser de la misma clasificación de vulnerabilidad. Se debe tener en cuenta que al noroeste de la cuenca hay una pequeña área con clasificación moderada, debido a la existencia de depósitos aluviales

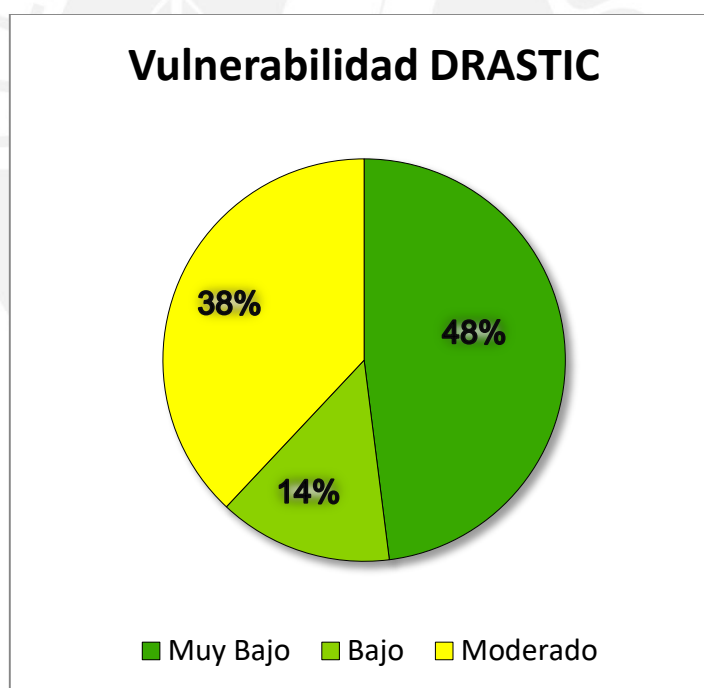


Figura 22: Gráfico porcentual de vulnerabilidad – Método DRASTIC
Fuente: Propio

Otro aspecto por el que el área cerca al mar tiene una clasificación moderada se debe a la pendiente del terreno, puesto que es muy baja en casi toda el área con clasificación moderada. Otro parámetro que ha influenciado es el nivel freático puesto que en la zona con vulnerabilidad moderada la profundidad del agua respecto a la superficie es pequeña

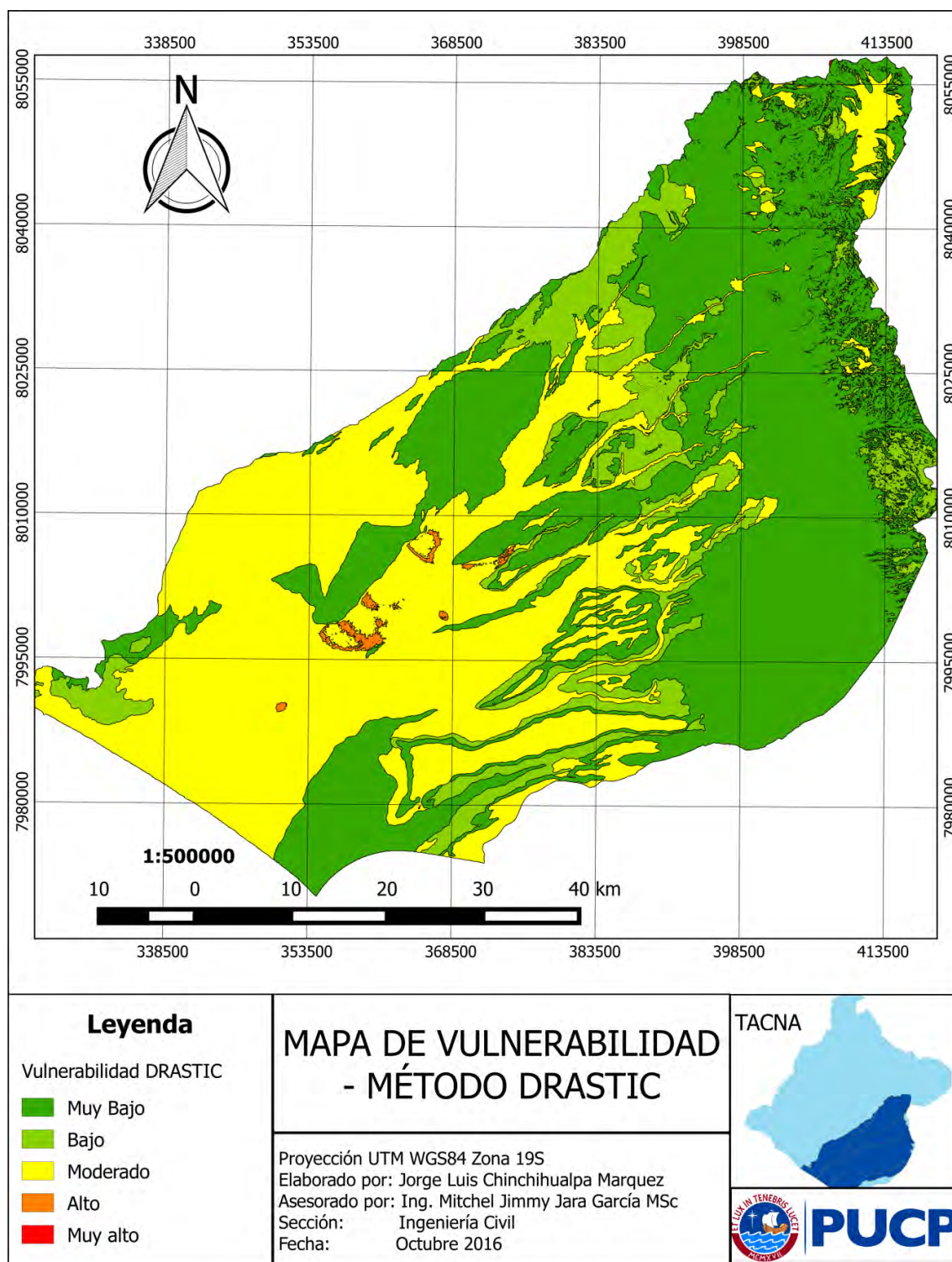


Figura 23: Mapa de vulnerabilidad – Método DRASTIC

Fuente: Propio

4.2 Vulnerabilidad del método GOD

Del mapa de vulnerabilidad mediante el método GOD, mostrado en la figura 25, se obtiene una susceptibilidad a la contaminación en un rango de despreciable (49%) a muy alto (38%) siendo en su mayoría despreciable, todo ello mostrado en la figura 24. En cuanto a la zona de La Yarada y Los Palos, se encuentra en muy alto en su mayoría.

El nivel muy alto se debe en su mayoría a su grado de confinamiento (grava arena y limo de tobas retrabajadas) puesto que permite una mayor fluidez al espacio del acuífero de cualquier contaminante. Tener que la formación geológica es muy parecida a lo largo del litoral marino. La distancia al nivel del agua subterránea es el otro factor por el que existe una alta vulnerabilidad. Se debe tener en cuenta que al noroeste de la cuenca hay una pequeña área con clasificación muy alta, debido a la existencia de depósitos aluviales. En la figura 23 se muestra el porcentaje de vulnerabilidad, según el método GOD, el cual el grado alto es parte de los Distritos de La Yarada y Los Palos.

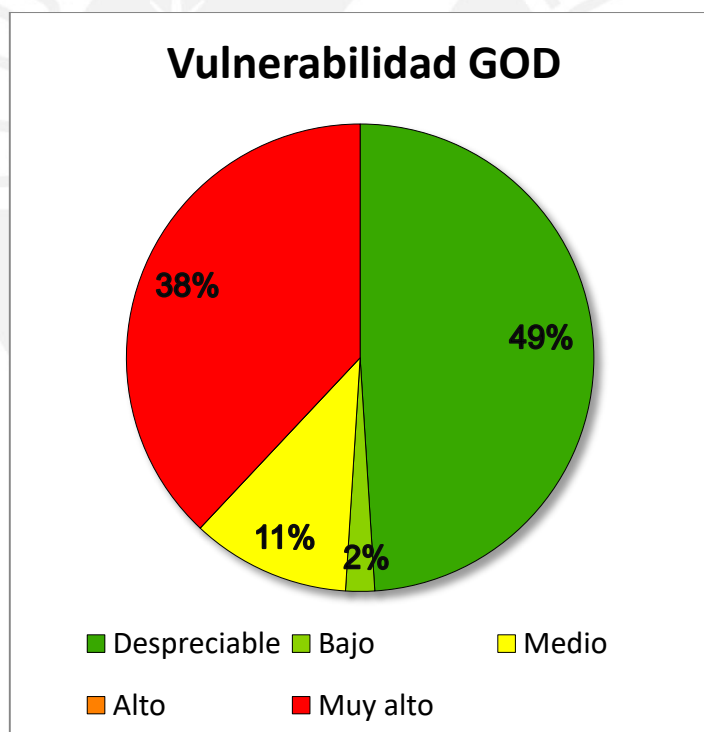


Figura 24: Gráfico porcentual de vulnerabilidad – Método GOD
Fuente: Propio

Se debe tener en consideración que al tener solamente 3 parámetros en este método, la precisión con la realidad es la menor comparada con los otros métodos; además que los parámetros que se consideran en este método también son desfavorables en los

otros métodos, Es por ello que hay un porcentaje muy considerable de vulnerabilidad alta.

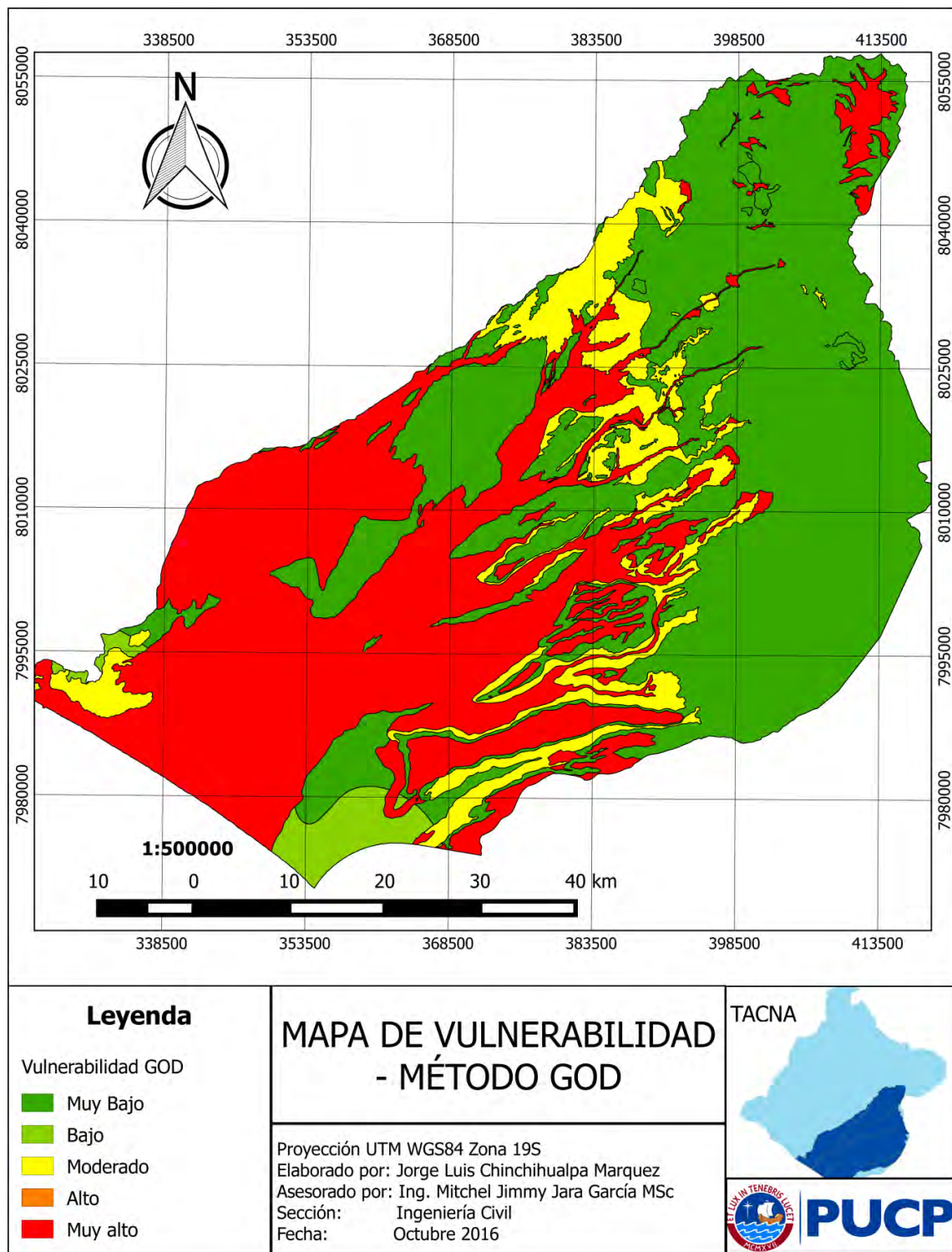


Figura 25: Mapa de vulnerabilidad – Método GOD

Fuente: Propio

4.3 Vulnerabilidad del método GALDIT

Del mapa de vulnerabilidad mediante el método GALDIT se obtiene una susceptibilidad a la contaminante, mostrado en la figura 27, en un rango bajo (81%) a alto (2%) siendo en su mayoría bajo. En cuanto a la zona de La Yarada y Los Palos, se encuentra con áreas divididas con las 3 clasificaciones.

El nivel alto se debe a varios factores; los cuales, uno de ellos es el nivel estático del agua, pues en el distrito de La Yarada y Los Palos hay nivel cercano al nivel del mar. Otro aspecto a tener en cuenta es la distancia al mar, debido a que los pozos cercanos al mar son mucho más propensos a la intrusión marina. Si esto llegase a pasar, se combinarían las aguas salinas con el agua subterránea captada de los pozos. En la figura 26 se representa el porcentaje de vulnerabilidad, según el método GALDIT, representando mediana y alta vulnerabilidad en los distritos de La Yarada y Los Palos.

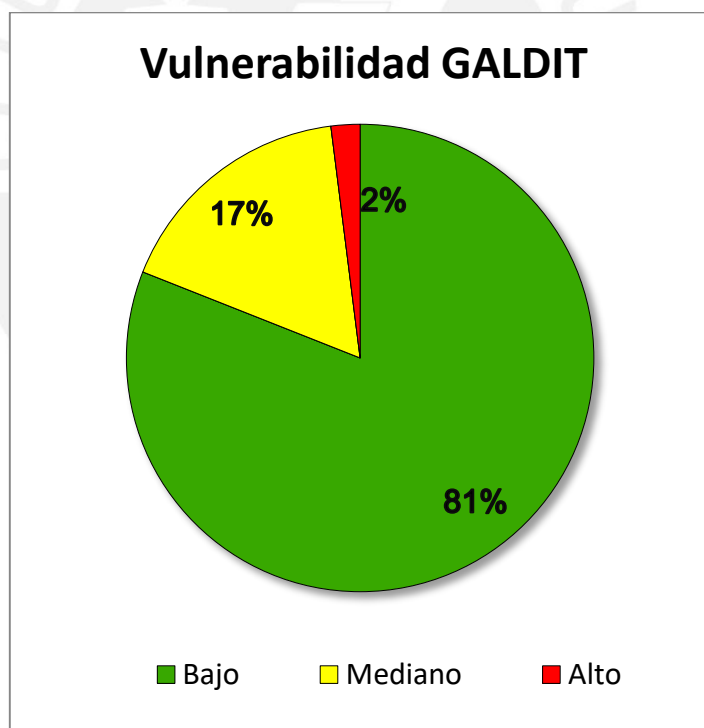


Figura 26: Gráfico porcentual de vulnerabilidad – Método GALDIT

Fuente: Propio

Otro parámetro que tiene influencia con el nivel alto de vulnerabilidad es el impacto existente de la intrusión marina, debido a que a partir de las concentraciones químicas que se tienen muestreadas, las áreas cercanas al mar fueron las más altas, y con ello las más vulnerables. Ante ello, este método es más detallado con el factor de cercanía

al mar, por lo que los niveles de vulnerabilidad de contaminación son más parecidos a lo que se puede presentar en la realidad.

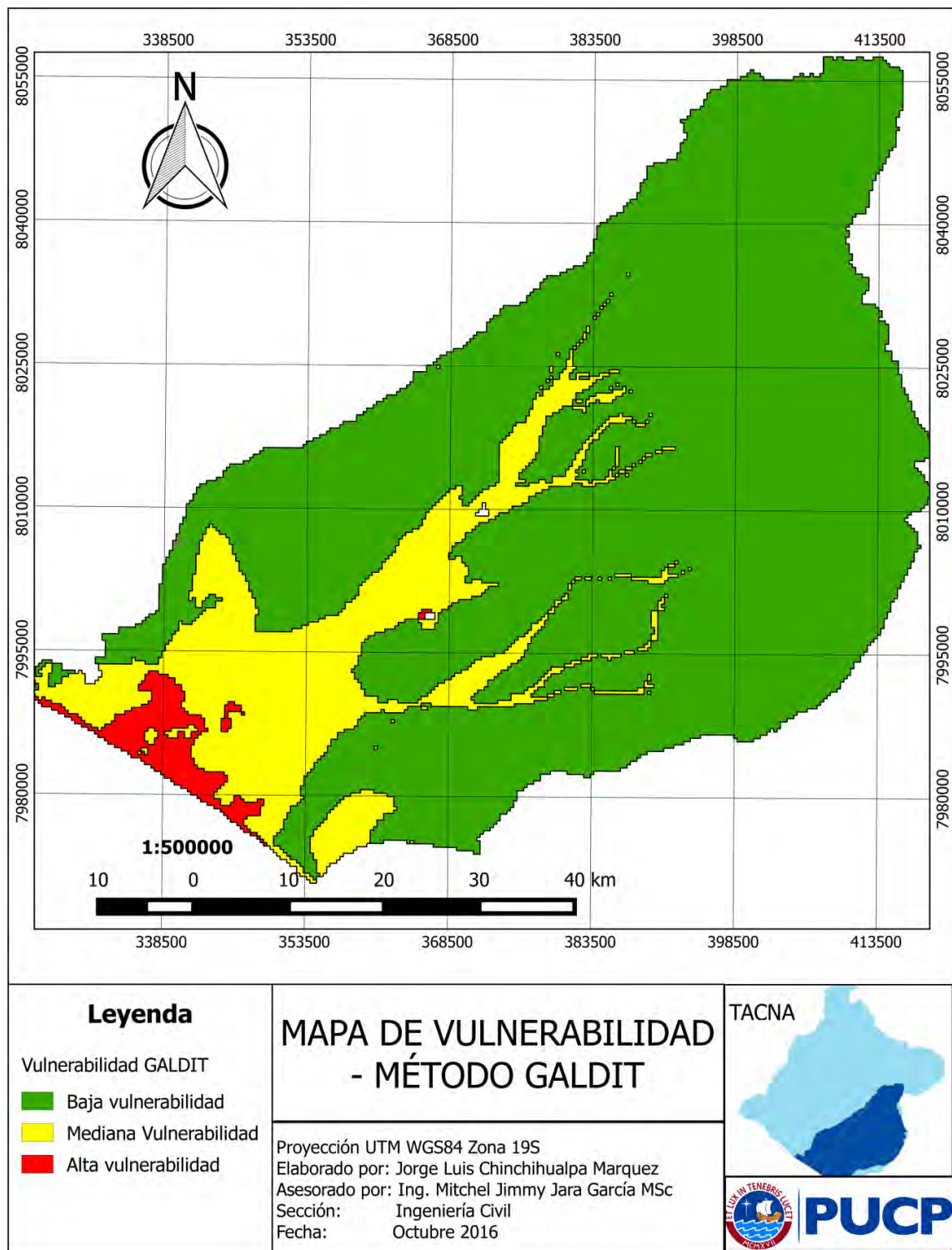


Figura 27: Mapa de vulnerabilidad – Método GALDIT
Fuente: Propio

4.4 Comparación de los métodos aplicados

En la tabla 30 se muestra la comparación de los 3 métodos de vulnerabilidad de contaminación (DRASTIC, GOD y GALDIT) en función a las áreas que tiene el área de estudio repartidas según la clasificación respectiva. Tener en cuenta que el área total es de 4213km².

Tabla 30: Comparación de vulnerabilidades de contaminación de los 3 métodos

Vulnerabilidad DRASTIC			Vulnerabilidad GOD			Vulnerabilidad GALDIT		
Clasificación	Área	%	Clasificación	Área	%	Clasificación	Área	%
Muy Bajo	2023	48	Despreciable	2065	49	Bajo	3413	81
Bajo	590	14	Bajo	84	2	Mediano	716	17
Moderado	1601	38	Medio	464	11			
Alto	0	0	Alto	0	0	Alto	84	2
Muy alto	0	0	Muy alto	1601	38			
total	4213	100	total	4213	100	total	4213	100

Fuente: Propio

Al hacer una comparación de los 3 métodos, se puede destacar que la clasificación con más baja vulnerabilidad es la que más predomina, mientras que la clasificación de vulnerabilidad mediana y muy alta es la que sigue siendo en, al menos, una de ellas el área con mayor vulnerabilidad, pero se debe considerar que el método GOD es el menos confiable por presentar poca información, el cual le hace un método menos preciso. Como se comentó anteriormente, tanto el método DRASTIC como el método GALDIT deben tener mayor confiabilidad en sus resultados puesto que presentan una mayor cantidad de parámetros, en especial el último método, debido a que la presencia de concentraciones químicas y la influencia que el área de estudio se encuentra cerca al mar, hacen más cercano a los factores que presenta el área de estudio. Es por ello que se toma en consideración que la vulnerabilidad alta y muy alta presenta valores pequeños.

En la tabla n°31 se hace una comparación con el porcentaje de sal, uno de los principales contaminantes de los acuíferos, y los 3 métodos de vulnerabilidad. Para ello, los valores que tienen los porcentajes más bajos coinciden tanto con el método DRASTIC como GALDIT. Para los valores intermedios tienen una correlación con el método DRASTIC y GALDIT. Por último, los porcentajes más altos se asemejan a los métodos GOD y GALDIT. Por lo tanto, solamente en función al porcentaje de salinidad, el método

GALDIT es el que tiene un mejor ajuste, y de esta manera, al que se puede aplicar para el área de estudio, mientras tanto el método GOD es el que presenta una menor relación siendo el menos recomendable para evaluarlo en el área de estudio.

Tabla 31: Comparación de vulnerabilidades de contaminación de los 3 métodos

Código	ESTE	NORTE	SAL (%)	DRASTIC	GOD	GALDIT
224	369764	8000260	0.12	Moderado	Muy alto	Bajo
99-A	361277	7975355	0.3	Muy bajo	Muy bajo	Bajo
63	348165	7985184	0.4	Moderado	Muy alto	Mediano
121	350168	7990999	0.4	Moderado	Muy alto	Mediano
81	339533	7985520	0.4	Moderado	Muy alto	Alto
94	341530	7987719	0.4	Moderado	Muy alto	Alto
58	351399	7979102	0.4	Moderado	Muy alto	Mediano
99	359159	7975061	0.4	Muy Bajo	Muy Bajo	Mediano
195	338171	7984150	0.5	Moderado	Muy alto	Alto
59	352798	7980519	0.5	Moderado	Muy alto	Mediano
1	372788	8009887	0.51	Moderado	Muy alto	Mediano
102	346374	7992558	0.6	Moderado	Muy alto	Mediano
5	341912	7986175	0.6	Moderado	Muy alto	Alto
16	341119	7986792	0.6	Moderado	Muy alto	Alto
49	336640	7984621	0.6	Moderado	Muy alto	Alto
217(145)	343004	7984469	0.6	Moderado	Muy alto	Mediano
220	337736	7984272	0.6	Moderado	Muy alto	Alto
PV-1	368768	8000243	0.64	Moderado	Muy alto	Mediano
101	346180	7993606	0.7	Moderado	Muy alto	Mediano
106	347150	7994284	0.7	Moderado	Muy alto	Mediano
107	347376	7993097	0.7	Moderado	Muy alto	Mediano
108	348121	7992141	0.7	Moderado	Muy alto	Mediano
112	344869	7992685	0.7	Moderado	Muy alto	Mediano
117	350611	7990105	0.7	Moderado	Muy alto	Mediano
128	351138	7989024	0.7	Moderado	Muy alto	Mediano
133	348728	7991345	0.7	Moderado	Muy alto	Mediano
22	340724	7988284	0.7	Moderado	Muy alto	Alto
43	338958	7983499	0.7	Moderado	Muy alto	Alto
166	341157	7987837	0.7	Moderado	Muy alto	Alto
60	351617	7981220	0.7	Moderado	Muy alto	Mediano
74	350025	7982145	0.7	Moderado	Muy alto	Mediano
PV-2	367475	7999673	0.8	Moderado	Muy alto	Mediano
66	343613	7989719	0.8	Moderado	Muy alto	Mediano
100	345686	7991491	0.8	Moderado	Muy alto	Mediano
115	348279	7990344	0.8	Moderado	Muy alto	Mediano

27	339843	7989478	0.8	Moderado	Muy alto	Alto
96	340100	7989877	0.8	Moderado	Muy alto	Alto
135A	333791	7985831	0.8	Moderado	Muy alto	Alto
162	347796	7979822	0.8	Moderado	Muy alto	Mediano
181	363588	8001816	0.9	Moderado	Muy alto	Mediano
65	347675	7986101	0.9	Moderado	Muy alto	Mediano
69 A	346409	7989990	0.9	Moderado	Muy alto	Mediano
88	346696	7991695	0.9	Moderado	Muy alto	Mediano
120	348824	7989252	0.9	Moderado	Muy alto	Mediano
122	349423	7990223	0.9	Moderado	Muy alto	Mediano
127	350337	7988338	0.9	Moderado	Muy alto	Mediano
129	349345	7988146	0.9	Moderado	Muy alto	Mediano
130	349875	7987071	0.9	Moderado	Muy alto	Mediano
132	344154	7991475	0.9	Moderado	Muy alto	Mediano
21	340341	7987937	0.9	Moderado	Muy alto	Alto
26 -A	341123	7989285	0.9	Moderado	Muy alto	Mediano
216 - 30	340487	7988696	0.9	Moderado	Muy alto	Alto
31	340328	7986271	0.9	Moderado	Muy alto	Alto
62	340856	7987326	0.9	Moderado	Muy alto	Alto
57	350461	7979950	0.9	Moderado	Muy alto	Mediano
105A	346228	7991368	0.99	Moderado	Muy alto	Mediano
170	363241	8001378	1	Moderado	Muy alto	Mediano
56-A	345661	7988919	1	Moderado	Muy alto	Alto
64	347184	7987009	1	Moderado	Muy alto	Mediano
68	343840	7990856	1	Moderado	Muy alto	Mediano
89	347050	7991040	1	Moderado	Muy alto	Mediano
3	341993	7980870	1	Moderado	Muy alto	Alto
11 "A"	340883	7984906	1	Moderado	Muy alto	Alto
14	340400	7985766	1	Moderado	Muy alto	Alto
67	345023	7990960	1.1	Moderado	Muy alto	Mediano
7	340679	7984399	1.1	Moderado	Muy alto	Alto
20	339832	7987637	1.1	Moderado	Muy alto	Alto
24	338896	7987896	1.1	Moderado	Muy alto	Alto
147	344734	7988888	1.2	Moderado	Muy alto	Mediano
47	336536	7985215	1.2	Moderado	Muy alto	Alto
17	339026	7985799	1.3	Moderado	Muy alto	Alto
25-A	338427	7988090	1.3	Moderado	Muy alto	Alto
46	339686	7986304	1.3	Moderado	Muy alto	Alto
50	349180	7978143	1.3	Moderado	Muy alto	Mediano
146	344788	7989712	1.4	Moderado	Muy alto	Mediano
2	341798	7980618	1.4	Moderado	Muy alto	Alto

18	339572	7986633	1.4	Moderado	Muy alto	Alto
73	339107	7987053	1.4	Moderado	Muy alto	Alto
1A (B-22)	343530	7981755	1.5	Moderado	Muy alto	Alto
4	341626	7981110	1.5	Moderado	Muy alto	Alto
39 A	338081	7985833	1.57	Moderado	Muy alto	Alto
8	338416	7982884	1.7	Moderado	Muy alto	Alto
35	337735	7986515	1.7	Moderado	Muy alto	Alto
191	342669	7980202	1.7	Moderado	Muy alto	Alto
126	351689	7987955	1.8	Moderado	Muy alto	Mediano
34	338121	7986874	1.8	Moderado	Muy alto	Alto
51	349950	7977558	1.9	Moderado	Muy alto	Mediano
54 - A	347886	7978302	1.9	Moderado	Muy alto	Alto
38	338572	7985369	2.1	Moderado	Muy alto	Alto
41	338933	7982625	2.1	Moderado	Muy alto	Alto
9	336614	7984575	2.2	Moderado	Muy alto	Alto
45	336390	7987331	2.3	Moderado	Muy alto	Alto
53	347977	7976349	2.7	Moderado	Muy alto	Mediano
142	335245	7985321	2.8	Moderado	Muy alto	Alto
36	337448	7986065	2.9	Moderado	Muy alto	Alto
48	338418	7983983	3	Moderado	Muy alto	Alto
172	348017	7977570	3.3	Moderado	Muy alto	Mediano
6	335845	7985583	3.5	Moderado	Muy alto	Alto
10	337305	7984387	3.7	Moderado	Muy alto	Alto
91	336286	7985921	4	Moderado	Muy alto	Alto
215	337835	7983317	4.7	Moderado	Muy alto	Alto
304 (2A)	341807	7980557	5.6	Moderado	Muy alto	Alto

Fuente: Propio

4.5 Propuestas de solución de las áreas más vulnerables

Según el método GALDIT, la existencia de áreas muy vulnerables permite considerar opciones de protección, con el propósito de evitar que se propague la contaminación en los acuíferos de esas áreas. Para ello, es necesario reconocer los contaminantes más incidentes, los cuales deben dividirse en 2 categorías: Contaminantes influenciados por la naturaleza y por la actividad humana.

El factor natural más importante viene a ser la salinidad debido a la intrusión marina. Según el análisis y el mapa GALDIT, toda la parte cercana al litoral marino se encuentra muy susceptible a la contaminación. Ante ello, es necesario frenar la combinación del recurso hídrico del acuífero con las aguas salinas. Una opción es la incorporación de Barreras hidráulicas, los cuales pueden ser tanto barreras de inyección como barreras

impermeables, debido a que obstruyen el paso del agua marina hacia el agua dulce. Las barreras de inyección mantienen una recarga forzosa puesto que ello permitirá tener un nivel piezométrico mayor al del nivel potencial del agua, además que mantendrá un equilibrio con la recarga neta del acuífero, siendo fundamental para que la zona de difusión o de transición se mantenga igual (zona de mezcla de agua dulce con agua marina, sabiendo que hay un mayor peso específico del agua del mar). Tal como se aprecia en la figura n°28, la zona de transición tiene una forma triangular en el que a condiciones normales (no existencia de pozos) se mantendría fijo, sin embargo la explotación del agua dulce da como consecuencia que el volumen perdido por el agua dulce sea ocupado por el agua salina dando como consecuencia una zona de transición más cercana a los pozos de bombeo. Debido a ello es que los puntos de muestreo cercanos al litoral marino tienen concentraciones de agua salina. Para ello, es necesario que se tenga pozos de infiltración (figura n° 29) ubicados entre los pozos más cercanos a la costa y el litoral marino, el cual será utilizado como medio de recarga de agua dulce proveniente de otro lugar (ejemplo: ríos). También hay otras formas de infiltrar el agua a los acuíferos para que se cumplan esos roles de recarga artificial. Uno de ellos es a través de depósitos de agua como las piscinas o incluso canales o zanjas (figura n° 30) que pueden utilizarse en forma paralela al litoral marino. Se debe considerar que la supervisión, seguimiento y control de la recarga se recomienda realizar en los mismos pozos de infiltración para un mejor monitoreo de la intrusión marina.



Figura 28: Zona de difusión o transición entre el agua dulce y agua marina
Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=lbZTid08g7Y>

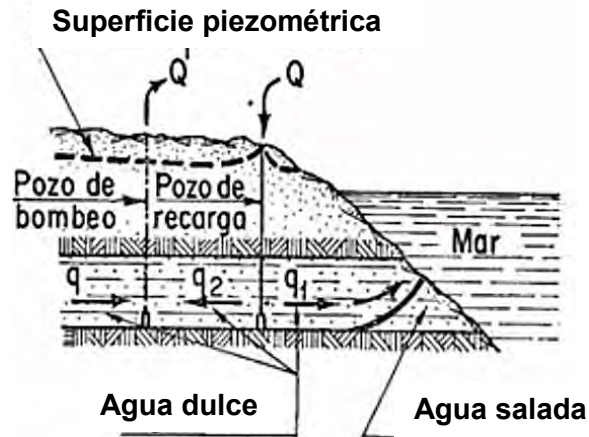


Figura 29: Ubicación y forma de uso de pozo de recarga
Fuente: Intrusión marina en acuíferos costeros - YouTube

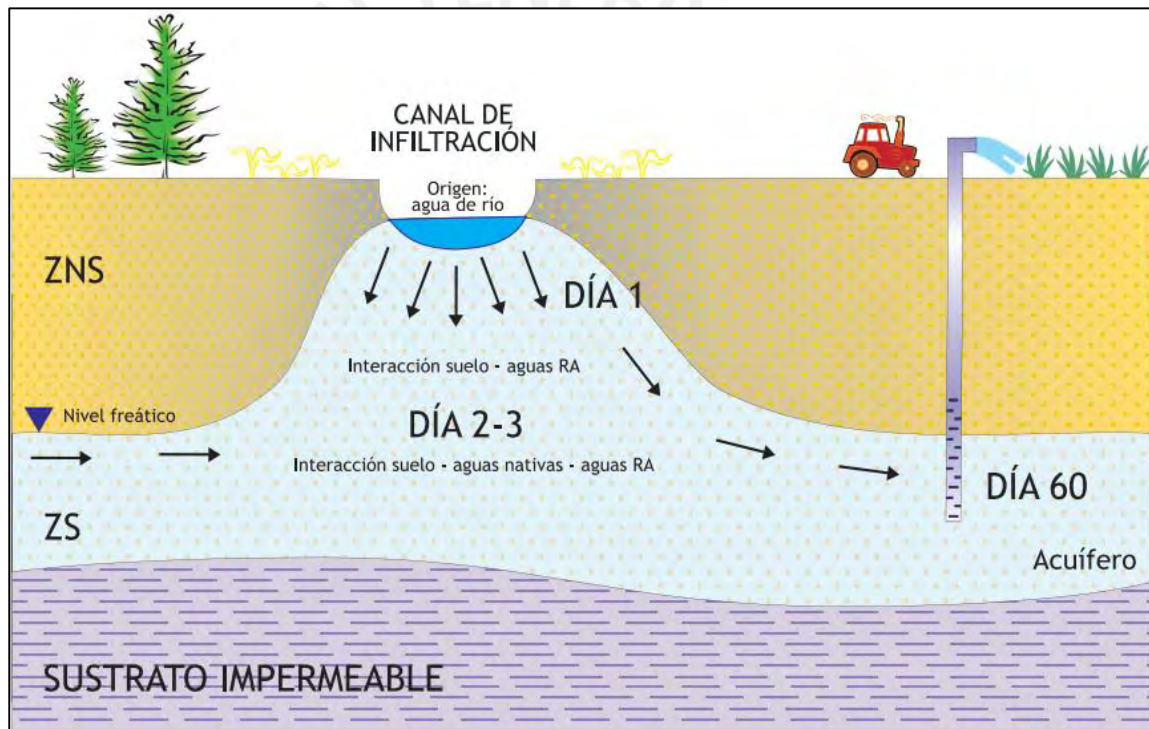


Figura 30: Canal de infiltración como medio de recarga artificial
Fuente: <http://www.dina-mar.es>

Por otro lado, las barreras impermeables se encargan de utilizar materiales con poca permeabilidad, siendo los acuíferos suficientemente explotados como para que la salinidad tenga un riesgo de contaminación bajo. Los materiales que se pueden usar son las arcillas, cemento, asfalto, bentonita u otras sustancias químicas, los cuales son usados como relleno de zanjas. Pese a ser una gran opción, uno de los mayores inconveniente es el costo aunque su mantenimiento sea económico, Mientras que las barreras de inyección son aplicables en acuíferos libres (uso de pozos, zanjas o

canales), las barreras impermeables son usables para acuíferos superficiales y/o poca profundidad. Ante ello, es recomendable el uso de la recarga artificial puesto que el área de estudio solo está conformado por acuíferos libres.

En cuanto a los contaminantes (Sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, etc.) influenciados por la actividad humana, tanto la agricultura como el uso del agua como consumo humano juegan roles muy importantes, puesto que el agua dulce de los acuíferos son usados principalmente para esas 2 actividades, además que son la única fuente de abastecimiento. Un uso excesivo de este recurso hídrico provoca un desnivel del nivel freático siendo un factor de vulnerabilidad directo. Ante ello, la actividad agrícola debe recibir un mayor control tanto en consumo de agua para cada tipo de plantación como en las medidas utilizadas para evitar contaminación de los propios cultivos. Puesto que en La Yarada y Los Palos predomina el cultivo del Olivo, la uniformización de sistemas de riego hará mucho más eficaz la cantidad de agua consumida por hectárea, además se debe considerar la textura del suelo, el nivel de humedad del suelo, la pendiente, profundidad de raíces. El sistema que se aplica actualmente en estos distritos es el riego por manta o riego por surcos (mostrados en la figura 31) siendo sistemas tradicionales, el cual es necesario un mayor seguimiento en cuanto al caudal de agua al inicio y al final del surco, puesto que se debe evitar posibles erosiones o arrastre de partículas. Otras opciones que ayudan con la dosificación del agua es el riego por aspersión, mostrado en la figura 32, el cual se ahorra en mano de obra y mantenimiento. Este tipo de sistema presurizado funciona por medio de mecanismos que permiten mover el agua a través de la presión siendo ventajoso el no necesitar de una nivelación del terreno y no provoca erosiones o problemas de corrimiento de las semillas. Por último, el riego por goteo, mostrado en la figura 33, es otro sistema recomendable, el cual funciona según la distribución de tuberías en el área de riego. Estas tuberías se usan como filtros que reparten el agua a través del goteo. Es ventajoso este sistema (riego por goteo) puesto que no es necesario nivelar el suelo, su eficiencia del agua es del 90% al menos y es usable tanto para el agua como para los fertilizantes. Ya sea el sistema de riego que se utilice, es importante su uso eficiente para evitar el uso excesivo del agua. Ante ello, el Ministerio de Agricultura brinda un manual de uso eficiente del agua según el sistema de riego que se aplique y también en función a otros aspectos como el tipo de cultivo, características del área de riego. Con el correcto uso de la eficiencia del agua habrá un mejor control de la recarga neta, y así del nivel freático.

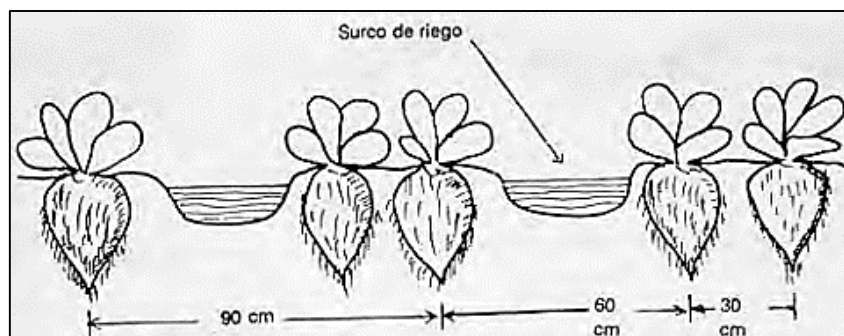


Figura 31: Sistema de riego mediante surcos
Fuente: Ministerio de Agricultura del Perú



Figura 32: Sistema de riego por aspersión
Fuente: Agriculturers.com



Figura 33: Sistema de riego por goteo
Fuente: <http://www.agrimar.es>

Otro aspecto a tener en cuenta son los pesticidas usados como una forma de fumigar posibles enfermedades en los terrenos, o los fertilizantes que son necesarios para la buena producción de cultivos en la región. Pese a ello, es necesario que se implementen mecanismos que eviten filtraciones de estos elementos hacia el interior del acuífero. La forma más adecuada es la capacitación para el buen cuidado en uso de estos elementos y las buenas prácticas agrícolas.

En cuanto al consumo humano, se debe destacar que se tienen inventariados los pozos que permiten obtener el agua para los distritos, sin embargo la presencia de otros pozos no formales provoca una explotación excesiva del agua. Por ello, es necesario continuar y mejorar con el seguimiento y control de los pozos que se encuentran en el área de estudio, puesto que ante un conocimiento de información sobre el recurso hídrico, permite obtener análisis y decisiones a tomar constantemente. Esta gestión del monitoreo del agua en el área de estudio es una actividad que realiza la Autoridad Nacional del Agua, el cual tienen lo ejecutan y se direccionan según los protocolos nacionales para la calidad de los recursos hídricos. A través de esa planificación se tendrá control de manejo óptimo del recurso hídrico en el área de estudio.



CAPITULO 5: CONCLUSIONES

El uso de los 3 métodos aplicados para evaluar la vulnerabilidad de contaminación fue necesario para tener el mejor ajuste posible, el cual esté correlacionado con el área de estudio y la información que se disponga. Al tener los 3 métodos, es posible comparar entre ellos, y de esta manera, elegir la metodología que se adecue más a la realidad de la zona de estudio. Los métodos que se eligieron fueron usados teniendo en cuenta el factor de la intrusión marina, la cantidad de parámetros usados para tener una mayor precisión y, opuestamente, un método que ofrezca un resultado rápido basado en pocos parámetros. Al finalizar, el método con parámetros más parecidos con el área de estudio fue el método elegido.

Tras haber determinado la vulnerabilidad de contaminación de los acuíferos en La Yarada y Los Palos, los 3 métodos muestran una vulnerabilidad baja bastante considerable (mínimo 51 %), lo que hace indicar que la mayor parte del área de estudio no presenta susceptibilidades de contaminantes, sin embargo al considerar el distrito de La Yarada y Los Palos únicamente (1000km² aproximadamente), la vulnerabilidad llega a ser al menos moderado(entre 11 y 38%) existiendo zonas con alta vulnerabilidad (entre 2 y 38%) siendo el método GOD el único que presenta un alto valor para este nivel.

Tomando en cuenta el porcentaje de salinidad, se concluye que el método GALDIT se ajusta más a los muestreos de concentración de sal, puesto que en las áreas en donde hay una alta vulnerabilidad, se encuentra mayor salinidad y donde es más bajo existe una menor salinidad, por lo que esta afirmación queda corroborada por los parámetros que se utilizan como es el impacto de la intrusión marina o distancia desde la costa. Se debe considerar que el método DRASTIC también presenta una correlación con las concentraciones de sal, lo que hace indicar que también es un método a tener en cuenta. Sin embargo, el método GOD presenta, en muchas áreas, gran incompatibilidad con el porcentaje de sal, por lo que no es un método recomendable para las características que tiene el área de estudio. Una de las principales razones por el que es poco aconsejable usar este método es por la poca cantidad de parámetros que influyen en el método.

El área de estudio, en general, presenta en su mayoría vulnerabilidad moderada a baja, sin embargo el método GALDIT(mejor ajuste) muestra un pequeño porcentaje de vulnerabilidad alta en una franja muy cercana al mar, por lo que las medidas de

preservación deben aplicarse en esa zona con el fin de mitigar estas vulnerabilidades. Si se toma en cuenta el método GOD, entonces sí hay una gran área con vulnerabilidad alta, por lo que se deberían aplicar medidas muy severas para contrarrestar a los contaminantes.

Para un mejor resultado en los 3 métodos, es necesario que se disponga de una información más amplia en todo el área de estudio. Algunas concentraciones como cloruros (Cl^{-1}), bicarbonatos (HCO_3^{-2}) o carbonatos (CO_3^{-1}) no permitieron realizar una interpolación precisa por la falta de suficientes puntos de muestreo, por lo que en diversas áreas del mapa no necesariamente tienen correlación con lo visualizado en campo. Otros aspectos como es el confinamiento de los acuíferos fueron obtenidos a partir de una interpretación del mapa de Litología, con lo que es un aspecto importante por el que los valores de dicho mapa se base en aproximaciones con respecto a la realidad. Éste parámetro puede ser un factor importante por el que el método GOD no tenga similitud con los otros métodos.

Las alternativas de solución se dividieron en contaminantes por la propia naturaleza y por la actividad humana. Una forma de solucionar la intrusión marina es mediante la implementación de barreras hidráulicas (barreras de inyección para acuíferos libres y barreras impermeables para acuíferos superficiales y poco profundos), el cual evita la combinación de aguas dulces con las salinas.

Una manera de tener un mejor control del agua para la actividad agrícola es mediante los usos eficientes de los sistemas de riego siendo el riego por aspersión el más ventajoso para brindar un control en la dosificación del agua. Se debe destacar que con una buena planificación el sistema por goteo puede ser otra buena opción considerando que su porcentaje de eficiencia del agua (90% mínimo) es mejor que otro tipo de sistema. Por último, el sistema de riego por surcos necesita de un seguimiento y control en campo mayor a los otros sistemas mencionados, lo que lo hace el menos recomendable. Además de ello, es fundamental tener sumo cuidado con el uso de pesticidas o fertilizantes en los terrenos; para ello, es necesario tener capacitación para las buenas prácticas agrícolas y el buen uso.

En cuanto el uso del agua para el consumo humano es primordial tener un constante seguimiento y control de la explotación del recurso hídrico tanto de los pozos formales como de los no formales, con el fin de siempre tener un análisis de uso, oferta y demanda

del agua de los acuíferos siendo la Autoridad Nacional del Agua el principal intermediario para brindar el mejor monitoreo que corresponda.

Es recomendable usar varios métodos de vulnerabilidad de contaminación, para que estas puedan ser validados con alguna concentración de algún contaminante, y de esta manera pueda obtenerse un método con el mejor ajuste, pero siempre teniendo en cuenta que los resultados tendrán un poco de incertidumbre dependiendo en gran medida de la información que esté a disponibilidad.

Por último, la ventaja del uso del Sistema de Información Geográfica es la utilización de la información propia del área de estudio, el cual, siendo georreferenciado, cuantificado y visualizado en un mapa llegan a ser los resultados de algún parámetro que se necesite ayudando en una gran medida en la aplicación o investigación para un determinado caso de evaluación de vulnerabilidad de contaminación. Su principal desventaja está influenciado con la información, puesto que si no se dispone de todos los datos necesarios, no podrá obtenerse un resultado fiable, por lo que es recomendable tener en cuenta datos de caracterizaciones hidrogeológicas, información cartográfica del área de estudio e información de imágenes satelitales para poder realizar una adecuada determinación de vulnerabilidad de contaminación.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Agüero, V., Pujol, R.(2000). Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. Tesis Lic. Ing. Civil. San José, CR, Universidad de Costa Rica

Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., Hackett, G.(1987). "DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings," US EPA Report 600/287/035, U.S. Environmental Protection Agency.

Asesores técnicos asociados (2002). Plan de gestión de la oferta de agua en las cuencas del ámbito del proyecto Tacna. Lima. Recuperado de:
<http://www.ana.gob.pe:8088/media/10970/tomo%20ii%20bases%20y%20estrategias%20para%20el%20plan.pdf>

Autoridad Nacional del Agua (Abril 2013). Acuífero Caplina. Dirección de planeamiento de Recursos Hídricos. Lima. Recuperado de:
[http://www2.congreso.gob.pe/sicr/comisiones/2012/com2012ciencia.nsf/0/42fcb88a2960f04c05257b5f00783c2d/\\$FILE/10_Acuifero_Caplina_Tacna.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/comisiones/2012/com2012ciencia.nsf/0/42fcb88a2960f04c05257b5f00783c2d/$FILE/10_Acuifero_Caplina_Tacna.pdf)

Autoridad Nacional del Agua (2009). Informe de Caracterización Hidrogeológica del Acuífero del Valle Caplina – La Yarada. Dirección de conservación y planeamiento de Recursos Hídricos. Administración Local de Aguas Tacna.

Biondi Antonio (2013) BIONDI ACEITUNAS. Encuentro Regionales. Tacna. Recuperado de :
<http://www.bcrp.gob.pe/docs/Proyeccion-Institucional/Encuentros-Regionales/2013/tacna/er-tacna-2013-biondi.pdf>

Breaban, Iuliana. (2012) Application of the method GALDIT for the cartography of groundwaters vulnerability: aquifer of Chaouia Coast. University of Iași, Morocco.

Bosque Sendra, J. (1992) Sistemas de Información Geográfica. Rialp. Madrid.

Cardona, O.D. (1985) Hazard, Vulnerability and Risk Assessment, unedited, working paper. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology IZIIS, Skopje, Yugoslavia.

Cavero, M (2013). Gidahatari – Consultora en recursos hídricos. Recuperado de: gidahatari.com/ih-es/metodos-determinacion-vulnerabilidad

Da Lio, Carol, Kruse, Pietro Teatini, Tosi (2015). Saltwater contamination in the managed low-lying farmland of the Venice coast, Italy: An assessment of vulnerability. Journal of Hydrology. Italy. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715303594>

DINA-MAR (2017) La gestión de la recarga de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. Recuperado de: <http://www.dina-mar.es/pdf/Diptico1.pdf>

Ferrer, L (08 de Agosto de 2014). TACNA: Desbalance hídrico en acuífero de la Yarada se agrava. Tacna: La República. Recuperado el 10 de marzo de 2016 de: <http://larepublica.pe/08-08-2014/tacna-desbalance-hidrico-en-acuifero-de-la-yarada-se-agrava>

Foster, E., Hirata, R. (1988). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas: Una metodología basada en datos existentes. OPS-CEPIS

Hispagua (Abril 2007). Aguas subterráneas: Contaminación de las aguas subterráneas. Recuperado de : http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/especiales/aguas%20subterraneas/3_contaminacion.htm

Gobierno Regional de Tacna(2009). Plan estratégico regional del sector agrario de Tacna. Recuperado de: http://www.agritacna.gob.pe/gestores/presenta/ofplanificadet/archivos/1117771164_1305064644.pdf

Gutiérrez, R. (2012). Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de las Pampas de Lequezama, mediante los métodos DRASTIC, SINTACS y GOD. (Tesis de postgrado). Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba.

Instituto Geofísico del Perú (2015). El clima en el Perú: Tacna. Recuperado de: <http://www.met.igp.gob.pe/clima/HTML/tacna.html>

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (1998). Carta Geológica Nacional. Recuperado de:
http://geocatminapp.ingemmet.gob.pe/complementos/Descargas/Mapas/publicaciones/serie_a/mapas/indice.htm

Instituto Geológico y Minero de España (1992). Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno: Aguas Subterráneas. Recuperado de:
http://www.igme.es/igme/publica/libros1_HR/libro75/pdf/lib75/in_10.pdf

K. Brindha , L. Elango.(2015). Cross comparison of five popular groundwater pollution vulnerability index approaches. Journal of Hydrology. India Recuperado de:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415001663>

Lobo Ferreira, J.P., Chachadi, A.G. (2005). Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part 1 - Application to the Portuguese Aquifer of Monte Gordo. The fourth inter-Celtic colloquium on Hydrology and management of water resources

Lobo Ferreira, J.P., Chachadi, A.G. (2005). Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 2 – GALDIT Indicators Description. The fourth inter-Celtic colloquium on Hydrology and management of water resources

Martinez, (2006). Fundamentos de Hidrogeología. Ediciones Mundi-Prensa

Núñez Leonardo (2015). Manual del Cálculo de Eficiencia para Sistemas de Riego. Ministerio de Agricultura y Riego. Lima - Perú

The Música & Ciencia (2015). 05-Intrusión Salina en Acuíferos Costeros. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=lbZTid08g7Y>

Santa Cruz (2002). Diseño de una Barrera de infiltración para el control y protección de las zonas vulnerables de la Subcuenca El Abra en la Isla de la Juventud (Tesis de maestría). ISPJAE

Werner, Joerg (1996). Introducción a la hidrogeología. Recuperado de:
http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1080066373/1080066373_03.pdf
ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s06.htm#top

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**Reparación de grietas en construcciones históricas de
tierra en áreas sísmicas**

**Parte V: “Desarrollo de método de diseño de refuerzo
sísmico y comprobación experimental”
(ANEXOS)**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

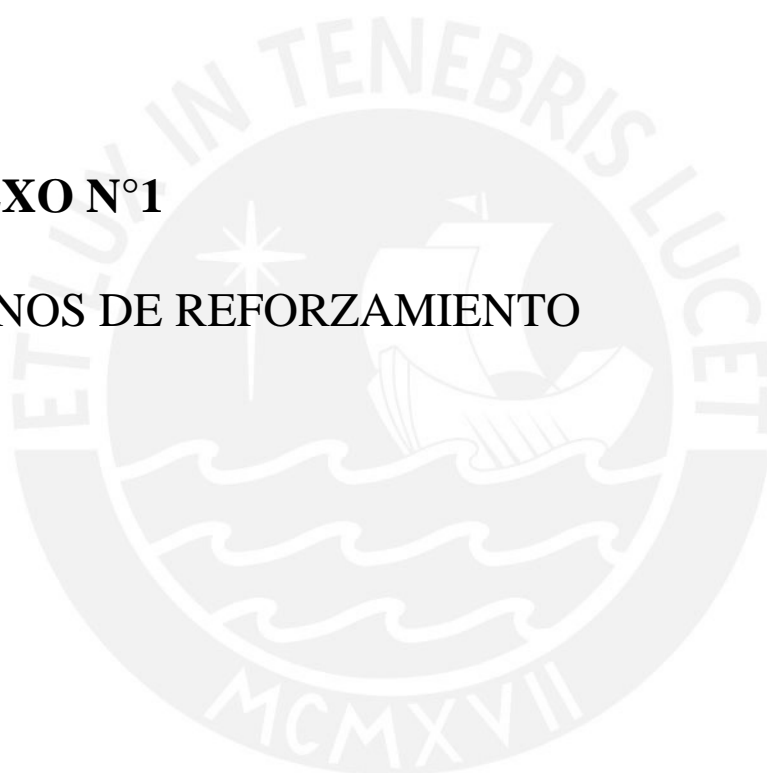
Hillary Crhistel Vargas Huallpa

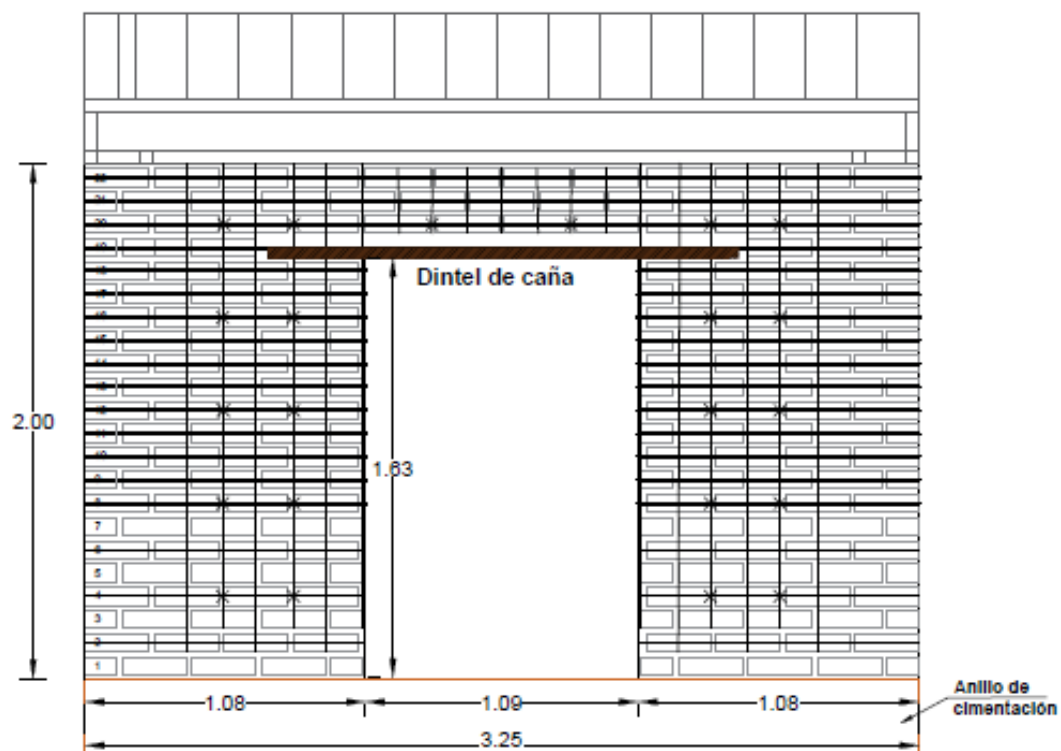
Dirigida por
Marcial Blondet, PhD

Lima, 2018

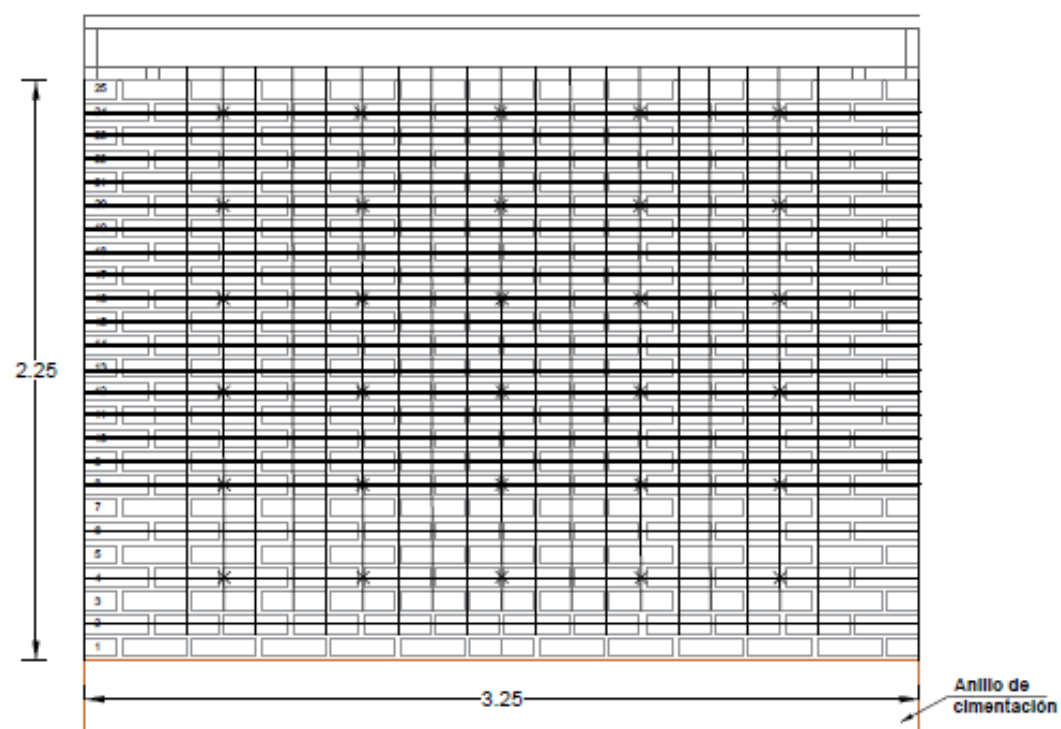
ANEXO N°1

PLANOS DE REFORZAMIENTO



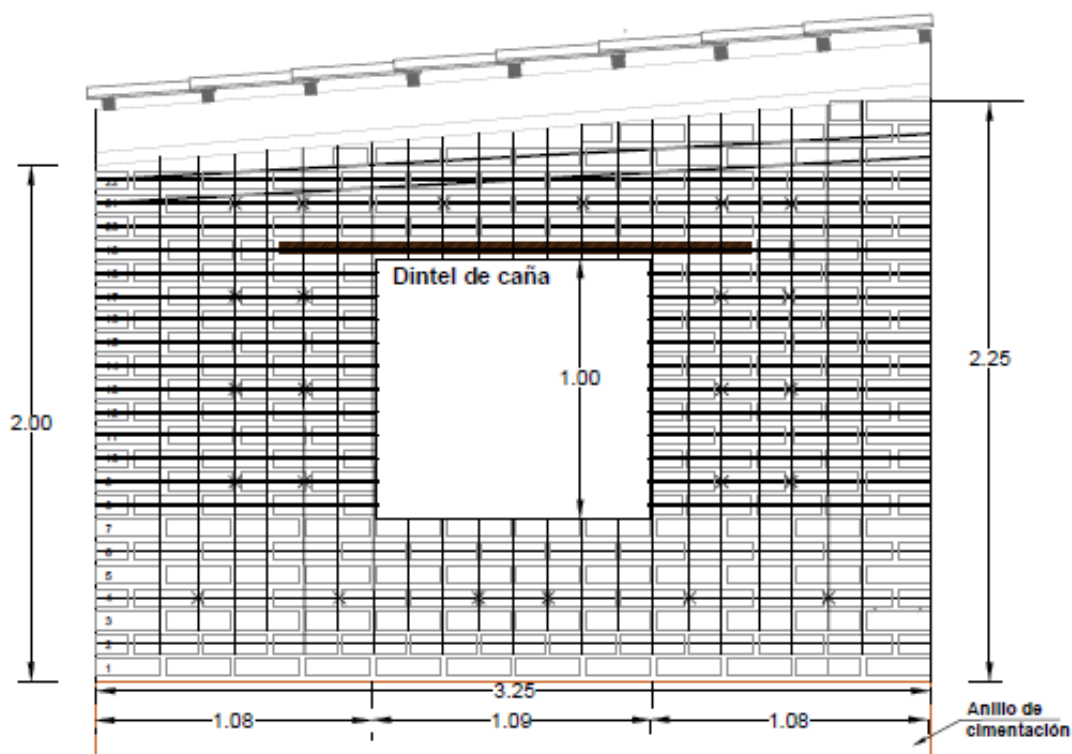


DISTRIBUCIÓN DE REFUERZO MURO TRANSVERSAL ANTERIOR

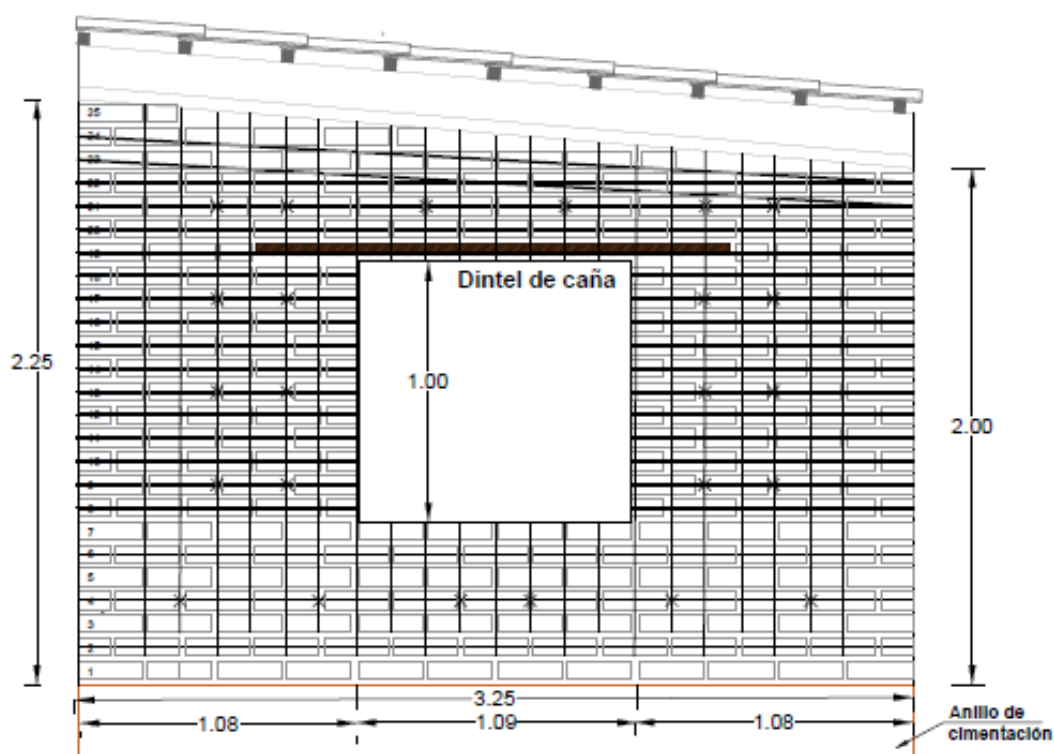


DISTRIBUCIÓN DE REFUERZO MURO TRANSVERSAL POSTERIOR

LEYENDA	
—	Cuerdas Simples $\frac{3}{8}"$
—	Cuerdas Dobles $\frac{3}{8}"$
X	Crossties

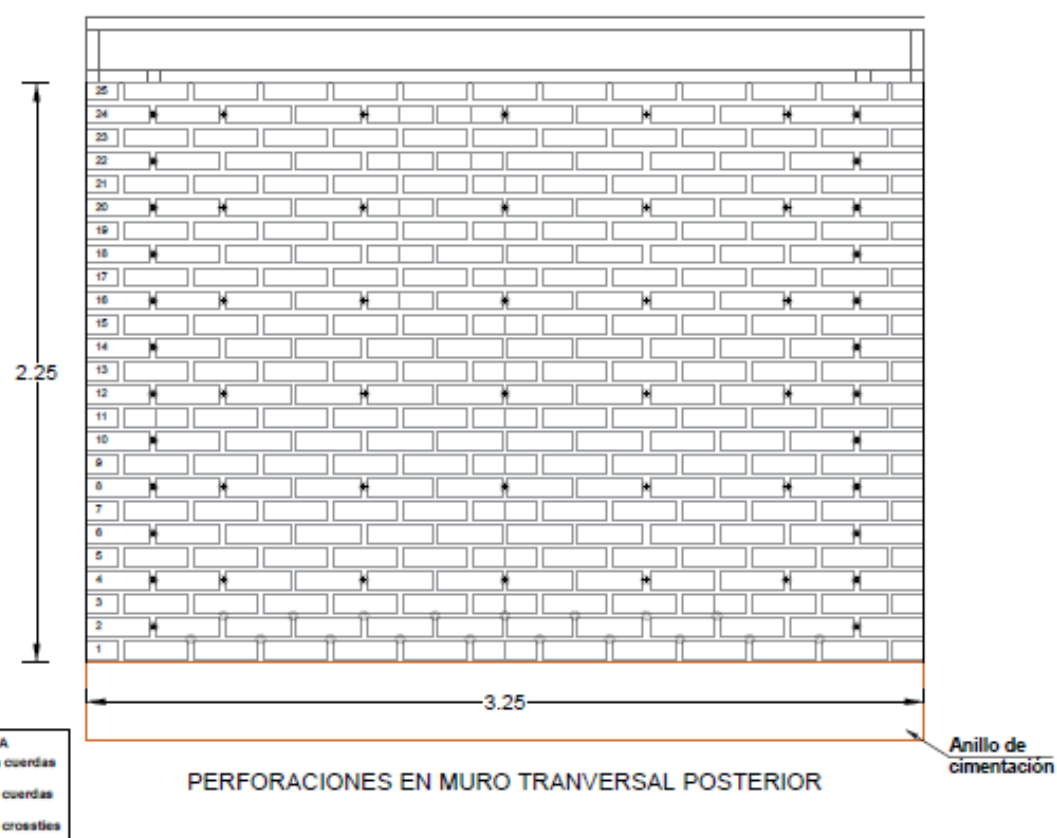
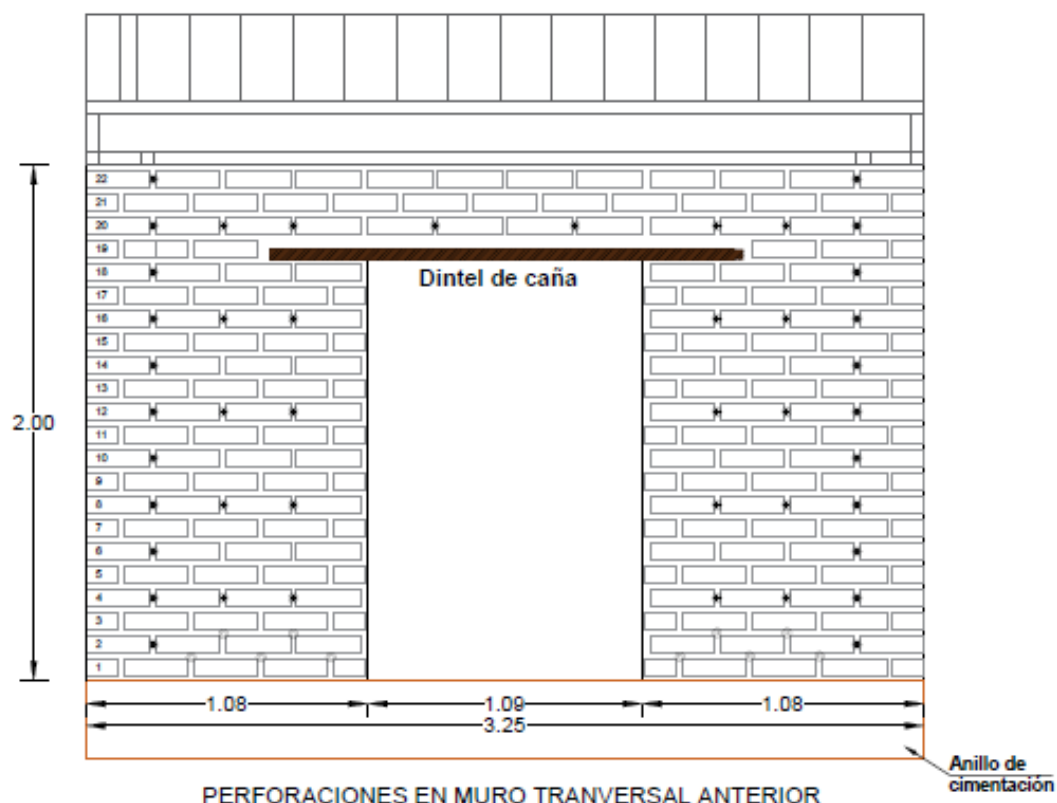


DISTRIBUCIÓN DE REFUERZO MURO LONGITUDINAL DERECHO



DISTRIBUCIÓN DE REFUERZO MURO LONGITUDINAL DERECHO

LEYENDA	
—	Cuerdas Simples $\frac{1}{2}$ "
—	Cuerdas Dobles $\frac{1}{2}$ "
X	Crossties



LEYENDA	
●	Agujeros para cuerdas horizontales
○	Agujeros para cuerdas verticales
+	Agujeros para crasoties

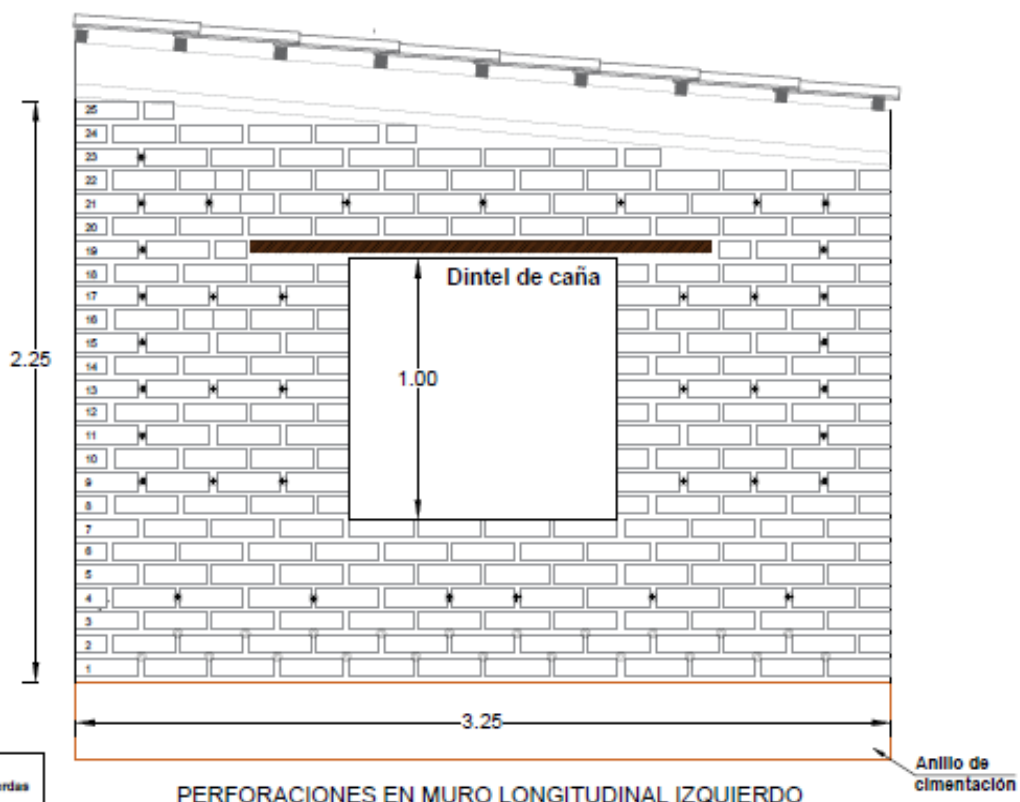
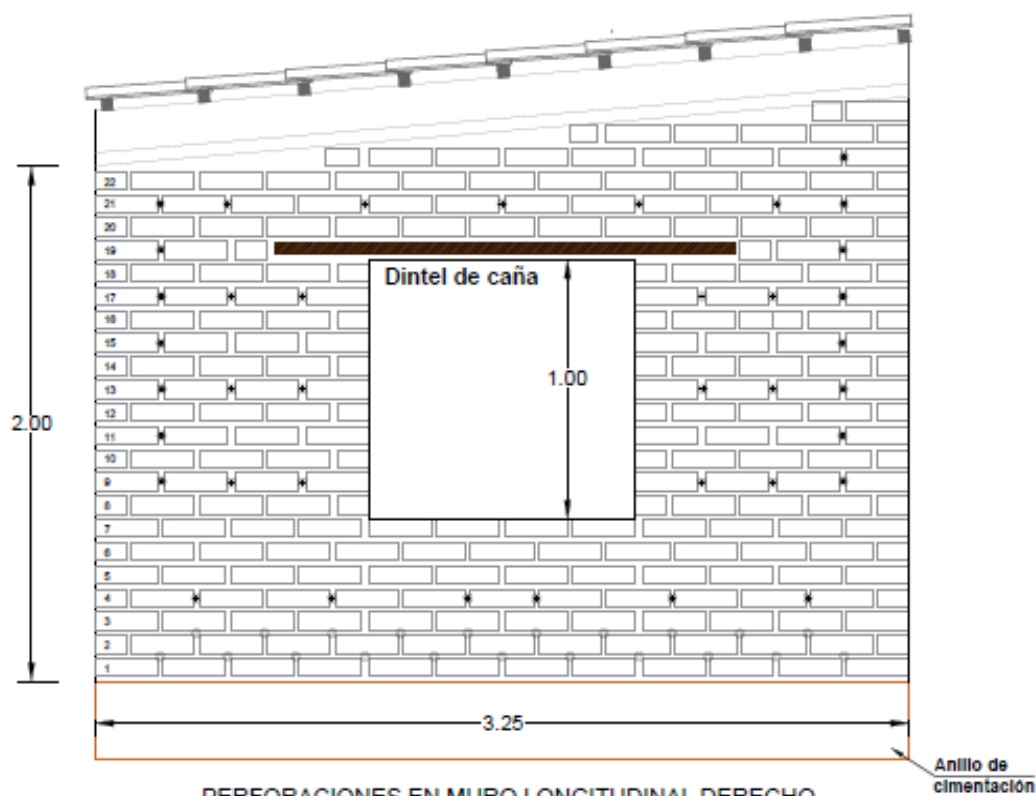
PUCP

Módulo Fisuras 5

PROYECTO: Ensayos de simulación sísmica
FOLIO: 2/25

REVISOR: Proyecto
ESCALA: 1/25
FECHA: ---
DISEÑO: ---

DEPTO. ESTRUCTURAS
E-03



LEYENDA	
●	Agujeros para cuerdas horizontales
○	Agujeros para cuerdas verticales
+	Agujeros para cross ties

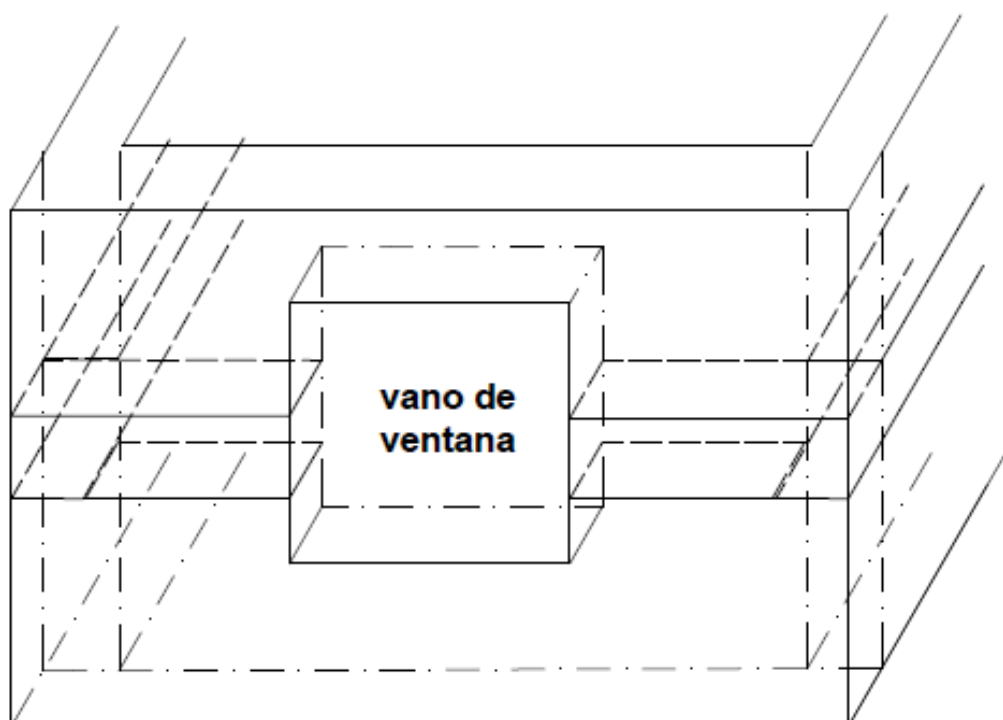
PUCP

Módulo Fisuras 5

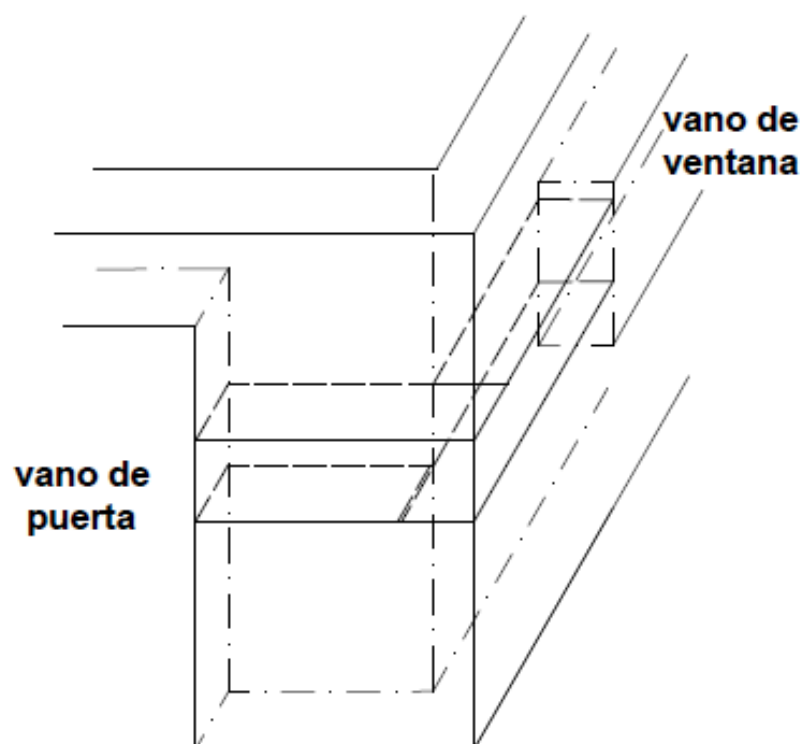
PROYECTO: Ensayos de simulación sísmica
TÍTULO: Perforaciones en muros longitudinales

REFERENCIA: Proyecto
ESCALA: 1/25
FECHA: DEL: ---

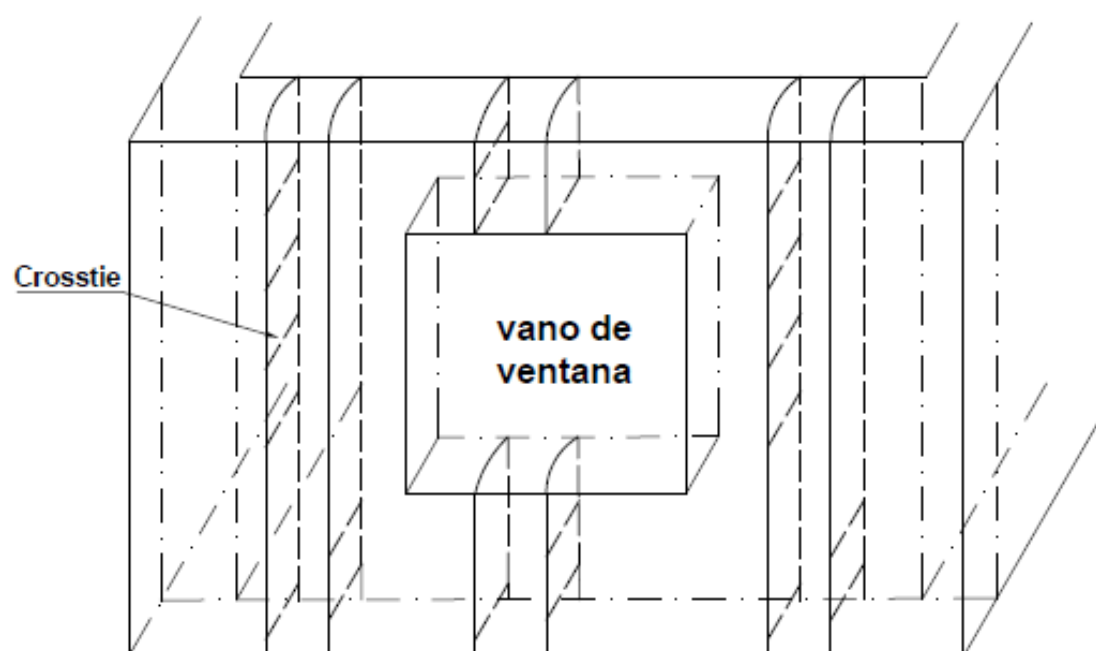
LOGO: E-04



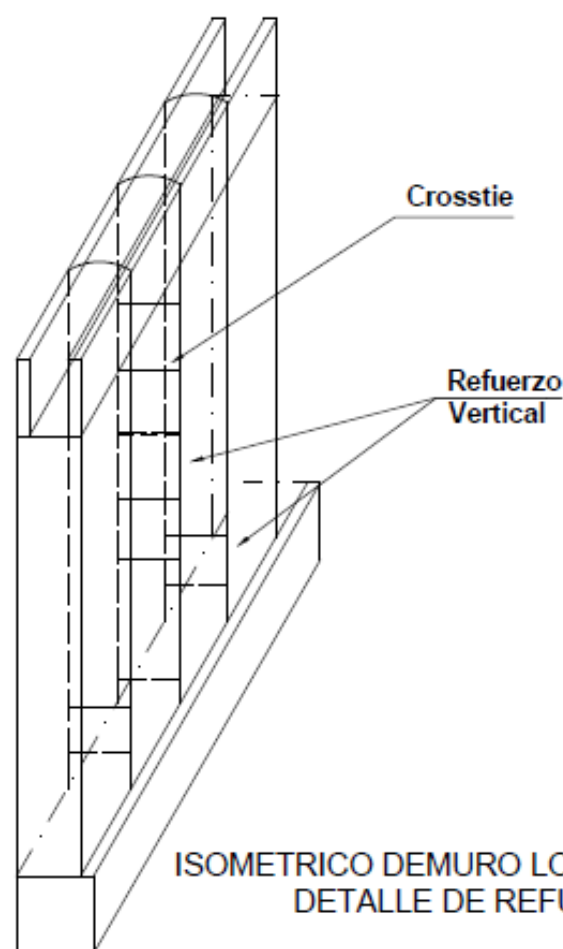
ISOMETRICO DE MURO CON VANO DE VENTANA
DETALLE CUERDAS HORIZONTALES



ISOMETRICO DE ENCUESTRO DE MURO
DETALLE CUERDAS HORIZONTALES

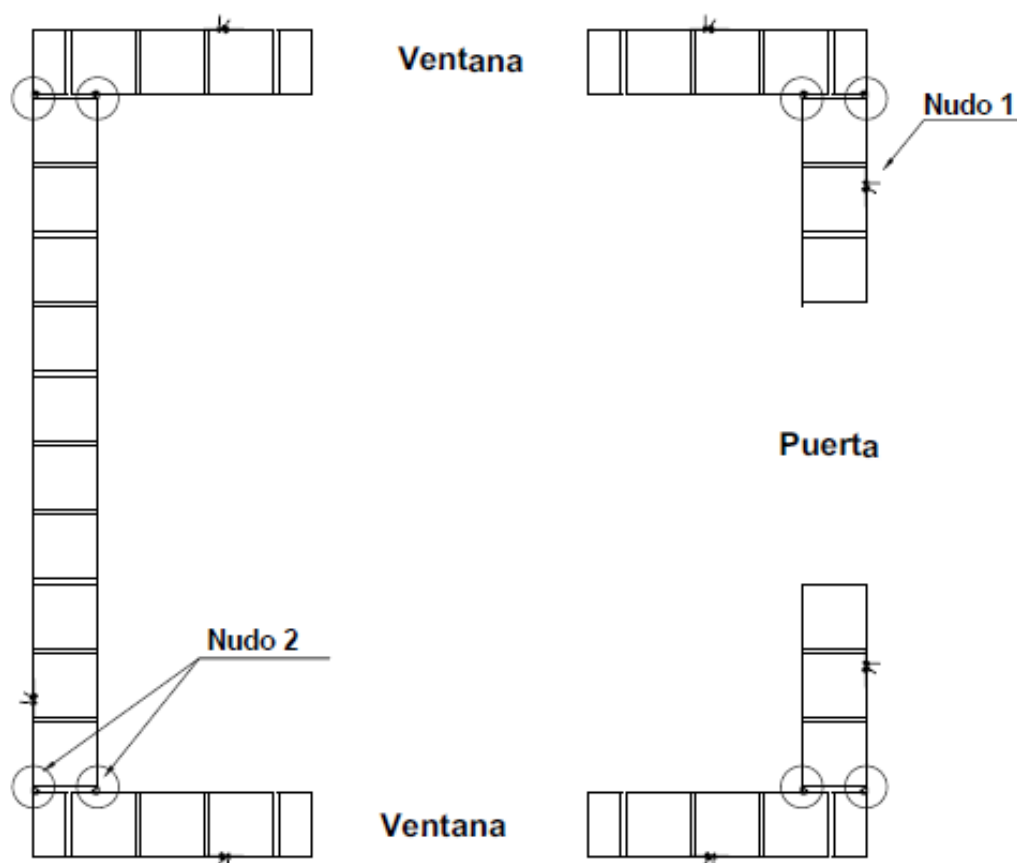


ISOMETRICO DE MURO CON VANO DE VENTANA
DETALLE CUERDAS VERTICALES

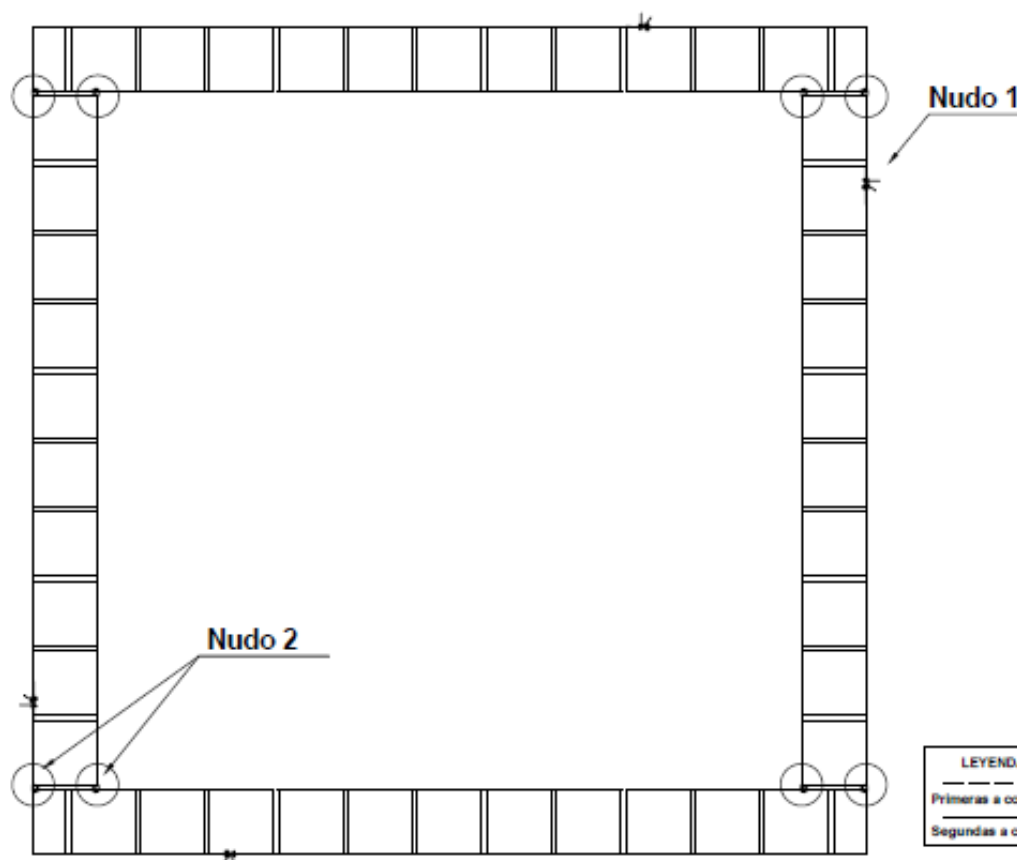


ISOMETRICO DEMURO LONGITUDINAL DERECHO
DETALLE DE REFUERZO VERTICAL

EMPLANTILLADO DE HILADAS PARES CON VANOS



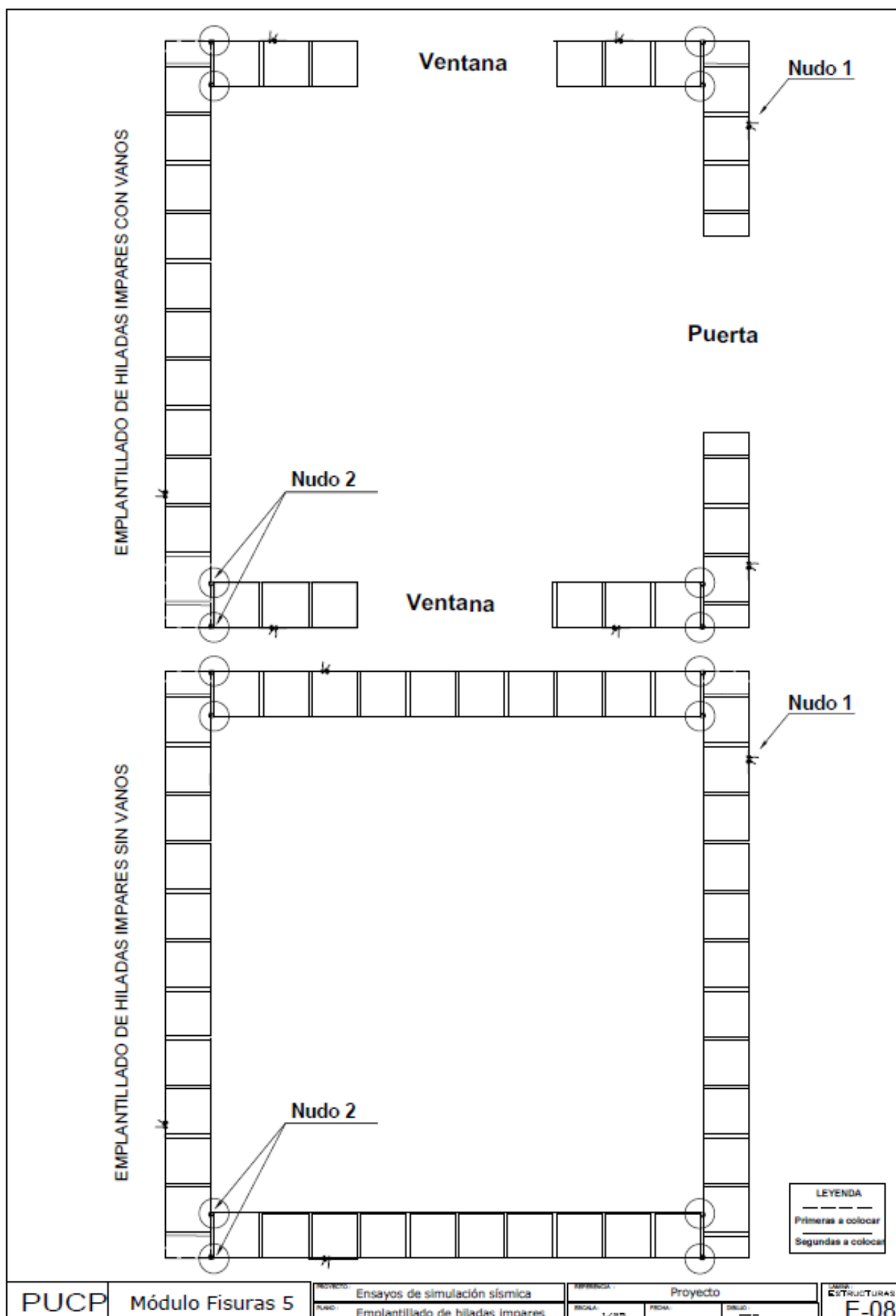
EMPLANTILLADO DE HILADAS PARES SIN VANOS

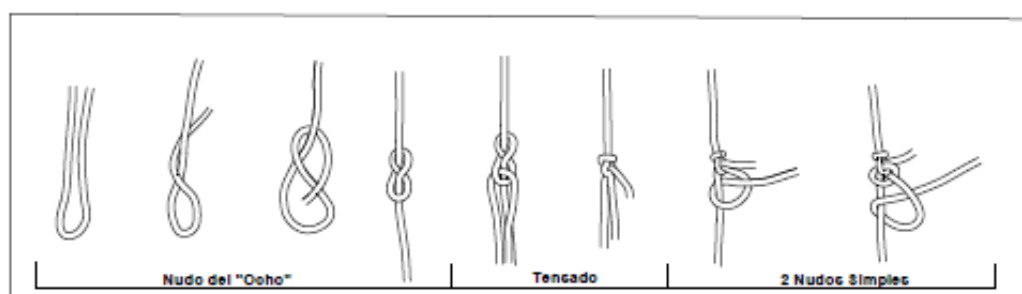
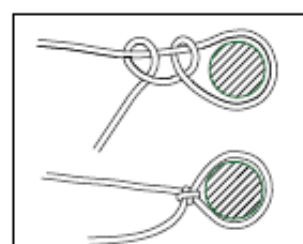
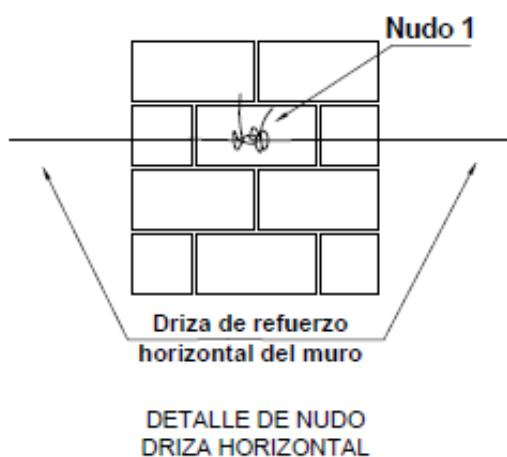
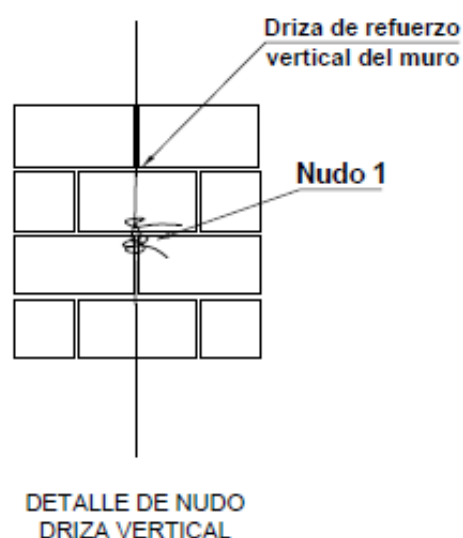
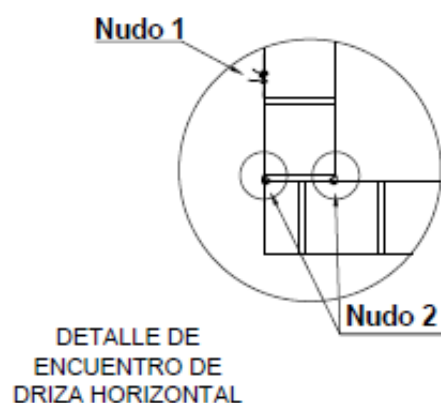


LEYENDA

 Primeras a colocar

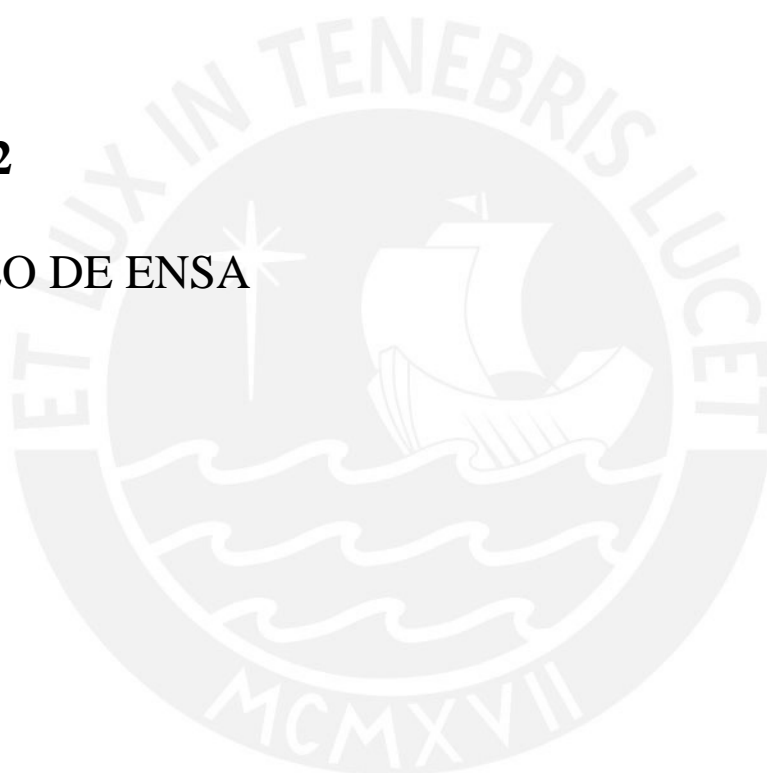
 Segundas a colocar





ANEXO N°2

PROTOCOLO DE ENSA



Estudio de la albañilería de adobe reforzada con drizas

Proyecto PUCP – INF – LE – 023-2014

PROTOCOLO DE ENSAYO DE MÓDULO DE ADOBE

1. EQUIPO DE ENSAYO

Nombre	Responsabilidad
Marcial Blondet	Director del proyecto
Nicola Tarque	Coordinador del ensayo
Carlos Sosa	Registro audio-visual
Guillermo Pachas	Control del simulador
Martín Huamancayo	Asistente electrónico del ensayo
Simeón Gonzales	Retiro de instrumentos
Marcos Fuentes	Equipo hidráulico
Qenti Herencia	Video en posición 1 / control ingreso puerta principal
Hillary Vargas	Video en posición 2 / marcación de grietas
Angely Valle	Video en posición 3
José Romero	Video en posición 4
Malena Serrano	Video en posición 5

Nota

- Sólo el coordinador del ensayo dará indicaciones al personal de control y al resto del equipo de ensayo.
- Los visitantes de cualquier procedencia se ubicarán en el balcón del segundo piso.

2. POSICIÓN DE EQUIPOS DE VIDEO Y FOTOGRAFÍA

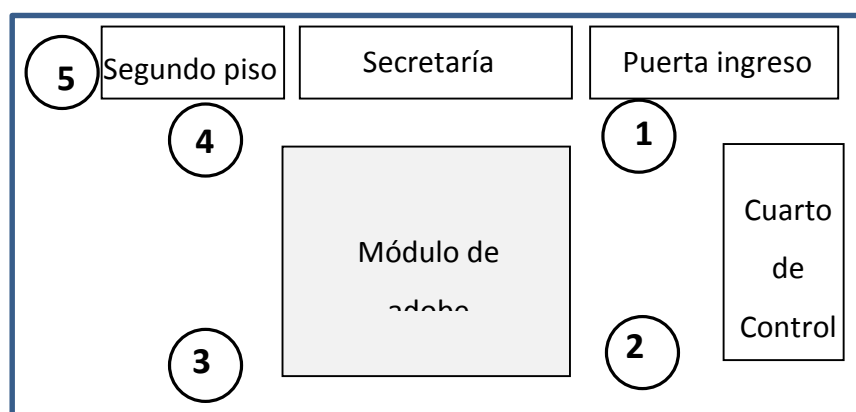


Figura 1: Esquema de las posiciones de puntos fijos para video

De filmación

- Posición 1, cerca de la puerta principal.
- Posición 2, frente al cuarto de control.
- Posición 3, al lado de cuarto de control de la máquina universal
- Posición 4, cerca de la puerta de secretaría.
- Posición 5, corredor en segundo piso.

De fotografía

- Siguiendo el cuadrante 1-2-3-4

3. ACTIVIDADES PRELIMINARES:

Lunes 10 de abril, 8am

1. Marcar puntos de video y de fotografía en el piso según esquema de Fig. 1
2. Identificar qué trípode va en cada posición
3. Revisar correcto funcionamiento de equipos de video y fotografía
4. Delimitar el área de trabajo con una cinta de seguridad
5. Verificar la instalación de la instrumentación

4. ENSAYO

Miércoles 12 de abril, 10am

El coordinador del ensayo indica el inicio de cada actividad.

Vibración libre (10:00 a.m.)

1. Despejar la plataforma del simulador
2. Autorizar al encargado del control del simulador que ejecute la vibración libre
3. Revisar posible agrietamiento en el módulo (marcar con plumón negro)

Fase 1 (10:30 a.m.)

1. Verificar que el equipo de ensayo esté listo para empezar el ensayo
2. Verificar los letreros en los muros.
3. Ordenar el inicio de la grabación
4. Autorizar al encargado del control del simulador que inicie el movimiento
5. Ordenar fin de la grabación
6. Indicar la toma de fotografías

Post ensayo

1. Indicar la marcación de fisuras (marcar con plumón rojo)
2. Foto del equipo de trabajo
3. Indicar la toma de fotografías

5. SECUENCIA DEL ENSAYO

Señal de comando de desplazamiento: Lima, 31 de mayo de 1970 con $D_{\max}=140\text{mm}$

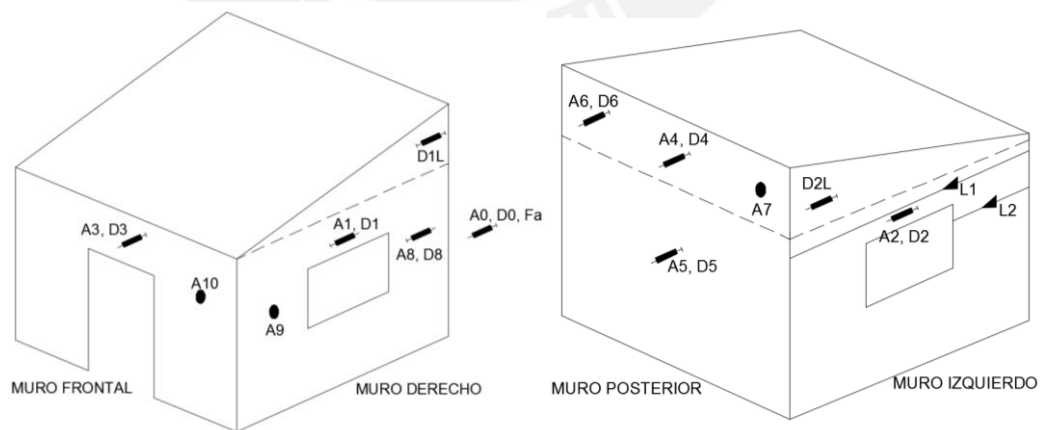


Figura 2: Desplazamiento del simulador sísmico ($D_{\max} = 140\text{mm}$)

Tabla 1: Etapas de movimiento

Etapa	Amplitud
Vibración libre inicial – pulso rectangular	1,5 mm
Fase 1 – señal 31 de mayo de 1970	140 mm
Vibración libre post fase 1– pulso rectangular	1,5 mm

6. Esquema de instrumentación



a) Vista 1

b) Vista 2

Figura 3: Esquema de instrumentación

Tabla 2: Información de la instrumentación

	Acelerómetro (A#)	Sensor de desplazamiento (D#)			Celda de carga (L#)
Marca	HBM	HBM			Hi-weight
Tipo	Viscoelástico Inductivo	LVDT			TS-A
Rango	±5 g	±100 mm	±200 mm	±250 mm	0.981 kN
Frecuencia de muestreo	200 Hz				
Resolución	0.005 g	0.01 mm	0.005 mm	0.004 mm	0.1 N

Nota. - Las celdas de carga tienen un FS de trabajo de 2.5

Tabla 3: Utilidad de cada instrumento de medición (ver Fig. 3)

Sensor	Descripción
A0	Aceleración en la mesa
A1	Aceleración en la parte superior del muro longitudinal derecho
A2	Aceleración en la parte superior del muro longitudinal izquierdo
A3	Aceleración en la parte superior del muro transversal frontal
A4	Aceleración en la parte superior del muro transversal posterior
A5	Aceleración en la parte media central del muro transversal posterior
A6	Aceleración en la parte superior izquierda del muro transversal posterior
A7	Aceleración en la parte superior derecha del muro transversal posterior
A8	Aceleración en la parte media derecha del muro longitudinal derecho
A9	Aceleración en la parte media izquierda del muro longitudinal derecho
A10	Aceleración en la parte superior del muro transversal frontal
D0	Desplazamiento de la mesa
D1	Desplazamiento en la parte superior del muro longitudinal derecho
D2	Desplazamiento en la parte superior del muro longitudinal izquierdo
D3	Desplazamiento en la parte superior del muro transversal frontal
D4	Desplazamiento en la parte superior del muro transversal posterior
D5	Desplazamiento en la parte media central del muro transversal posterior
D6	Desplazamiento en la parte superior izquierda del muro transversal posterior
D8	Desplazamiento en la parte media derecha del muro longitudinal derecho
DL1	Desplazamiento local en la parte superior derecha del muro longitudinal derecho
DL2	Desplazamiento local en la parte superior izquierda del muro longitudinal derecho
L1	Tensión en una cuerda superior L1 del muro longitudinal izquierdo
L2	Tensión en una cuerda superior L2 del muro longitudinal izquierdo

ANEXO N°3

PAPER EARTH USA 2017: Evaluation of a rope mesh reinforcement system for adobe dwelling in seismic areas

EVALUATION OF A ROPE MESH REINFORCEMENT SYSTEM FOR ADOBE DWELLINGS IN SEISMIC AREAS

Marcial Blondet, Nicola Tarque, Julio Vargas-Neumann, and Hillary Vargas
Pontifical Catholic University of Peru (PUCP)

Abstract

Throughout the world millions of people are at unacceptable risk because they live in unreinforced earthen dwellings, which have consistently shown extremely poor structural behavior during earthquakes. This article presents preliminary results from an ongoing project undertaken at the Pontifical Catholic University of Peru (PUCP), whose main objective is the development of low-cost and easy to implement reinforcement techniques for adobe constructions located in seismic areas.

1. INTRODUCTION

The high seismic vulnerability of traditional adobe dwellings is well documented. Most of these houses are built without any technical advice by families of limited economic resources, and their earthen walls do not have the capacity required to withstand the inertia forces caused by ground shaking. As a result, every time an earthquake occurs in areas where construction with earth is common, there is tragic losses in human lives and property damage and the destruction of invaluable historical monuments. A research team of the Pontifical Catholic University of Peru (PUCP) has been working for many years to find simple and economical reinforcement solutions to address this problem. Recently, they have developed a reinforcement system consisting of a mesh made with nylon ropes which cover all the walls, thus preventing the overturning of large wall portions which have broken apart by the earthquake motions. This paper presents the results of an experimental evaluation of this system, as well as a proposal for an engineering design method.

2. ROPE MESH REINFORCEMENT SYSTEM

Seismic failure of adobe structures is triggered by the progressive formation of cracks in their walls due to the low tensile strength of the adobe masonry. The most common types of cracks are x-shaped cracks due to in-plane shear forces, and vertical cracks at the wall corners due to out-of-plane forces. Vertical cracking at the corners produce the separation of adjoining walls and may be followed by overturning of the walls. When the roof joists are parallel to the street the façade walls may overturn in one piece (Fig. 1, left). When the joists are

perpendicular to the street, the façade wall may pull portions of the roof (Fig. 1, right). Adequate seismic reinforcement is required to prevent wall overturning.



Fig 1. Collapse of façade walls of adobe houses due to the Pisco (Peru) earthquake of 2007

The proposed seismic reinforcement technique for adobe houses consists of enveloping all walls with a mesh made of synthetic ropes. (Natural ropes would tend to disintegrate with time). The purpose of the mesh is to keep the pieces together after the walls have fractured due to the seismic forces.

An experimental testing program was executed to assess the feasibility of this reinforcement system. It is described in detail in Blondet *et al.* (2016). A full-scale single-story adobe house model was built on the PUCP's Structural Laboratory. It consisted of four adobe walls 3.00 m long and 0.25 m wide, with a sloped roof. Adobe blocks measuring 250 x 250 x 90 mm were made using soil, straw and coarse sand (5:1:1 in volume). The adobe blocks were joined with 20 mm thick mud mortar also made with soil, straw and coarse sand (3:1:1 in volume). The model was first tested on the unidirectional shaking table to induce considerable seismic-like cracking. After the cracks were repaired with mud injection, the model was reinforced with an external mesh made of nylon ropes (halyard) with 1/4" nominal diameter, and 2 kN ultimate strength. The rope spacing was consistent with the layout of the adobe blocks. The separation of the vertical ropes separation was equal to the length of one adobe block and that of the horizontal ropes was equal to the height of two a half courses of adobe masonry (also 250 mm). All ropes were tensioned by means of metal turnbuckles. The meshes on both faces of each wall were joined together by 1/8" halyard crossties, which crossed the walls through the mortar joints at selected places. The model was then tested again on the shaking table with successive table motion phases with horizontal acceleration of 0.3, 0.6, 0.9 and 1.3 g, respectively. Figure 2, left, shows a diagram of the adobe model, the reinforcement mesh configuration, and the damage pattern after the strongest shaking phase. The model suffered significant damage,

consisting mainly on the walls separating in large blocks, but the reinforcement provided was able to keep the wall pieces together, thus avoiding partial collapses and preserving the integrity of the structure.



Fig. 2. Sketch of damage pattern and general view of the model after shaking table testing.

The proposed reinforcement system was deemed adequate to provide safety to the adobe model tested on the shaking table. As a result of this experimental validation, the mesh reinforced system is now accepted in the Peruvian Code for earthen construction (NTE080 2017). An engineering design method was then developed in order to be able to specify the mesh configuration required to protect for any adobe structure located in seismic areas.

3. DESIGN PROCEDURE

When adobe structures are subjected to seismic motion, as in the shaking table tests, the main damage consists of the breaking up of its walls in large blocks, which then may overturn (Fig.3, left). This situation can be represented schematically by a simple dynamic model in which an overturning block is restrained by a set of elastic ropes. Assuming that the main structure is still intact and moves together with the ground, it is possible to generate a simplified structural model as shown in Fig. 3, right.

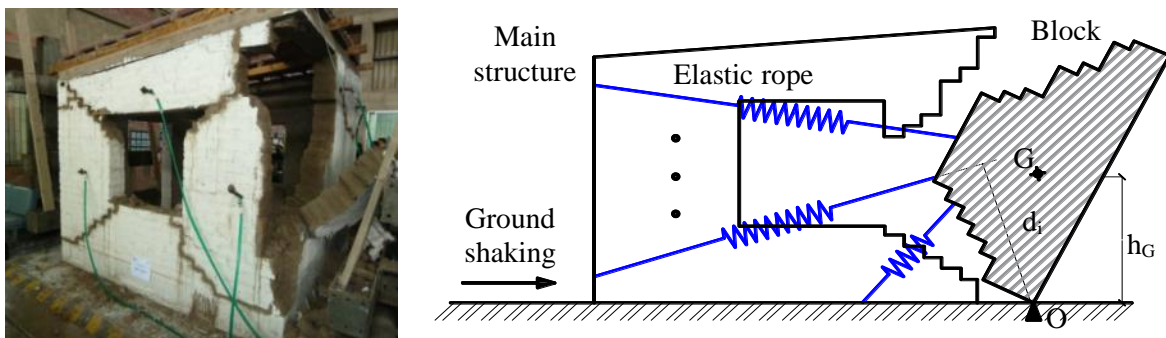


Fig. 3 Overturning of wall piece and simplified model for adobe block dynamic analysis

This simple rigid block model can be used to estimate the forces in the elastic ropes caused by the seismic ground motions. The equation of motion and expressions used to estimate the elastic forces in each rope are presented in Blondet *et al.* (2016). This block dynamic analysis was used to develop the following procedure to design the rope mesh required to protect a given adobe structure located seismic zones:

1. Consider a pseudo-acceleration design spectrum according to the building site
2. Choose an available synthetic rope. Estimate its mechanical properties
3. Select a rope mesh configuration consistent with the masonry pattern
4. Estimate the Factor of Safety for all possible overturning wall block mechanisms
5. (FS = ultimate strength/seismic force)
 - If the FS of all ropes is greater than 2 for all mechanisms, go to step 5
 - If the FS of any rope is smaller than 2 for any mechanism, go to step 3
 - If process does not converge go back to step 2
6. The rope mesh design is safe. Evaluate costs and produce drawings

A second full-scale adobe housing model, identical to the previous one, was built at the Lab, to be tested at the shaking table in order to evaluate the adequacy of the proposed design method. In this case, a rope with a smaller diameter was used, and therefore the reinforcement pattern was different than in the previous case. The design method would prove to be adequate if the reinforced model showed an adequate response under very intense shaking.

4. REINFORCED ADOBE MASONRY MODEL

Figure 4 shows the possible collapse mechanisms for this simple one-room, single story structure, when subjected to ground shaking in the direction of the walls with windows. This time a widely available 5/32" nominal diameter, and 0.7 kN ultimate strength nylon rope was selected to reinforce the four walls of the model. (The previous model ropes had 1/4" diameter and 2 kN ultimate strength). Several spacing patterns for the horizontal ropes were analyzed for all three mechanisms until a suitable configuration was obtained, with a Factor of Safety larger than 2 in each rope.




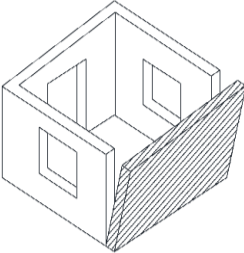
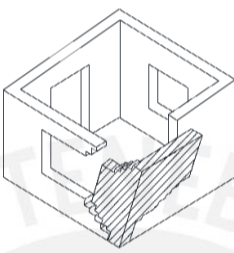
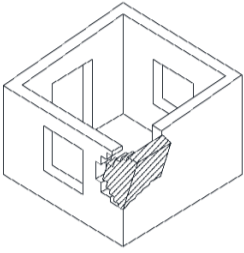
Full wall overturning	Complete corner overturning	Top corner portion overturning
		
		

Fig. 4 Collapse mechanisms analyzed for tested adobe housing model

The final 5/32" nylon rope mesh configuration is shown in Fig. 5. The required rope spacing is considerably shorter than in the case of the 1/4" mesh, and therefore placing the reinforcement on the walls would be more labor intensive. Twenty rows of horizontal ropes were needed. The vertical ropes are spaced at 125 mm. They span from the concrete foundation beam to the top of the wooden crown beam. The cost of the required ropes in Peru is approximately 3 US dollars per square meter of wall.

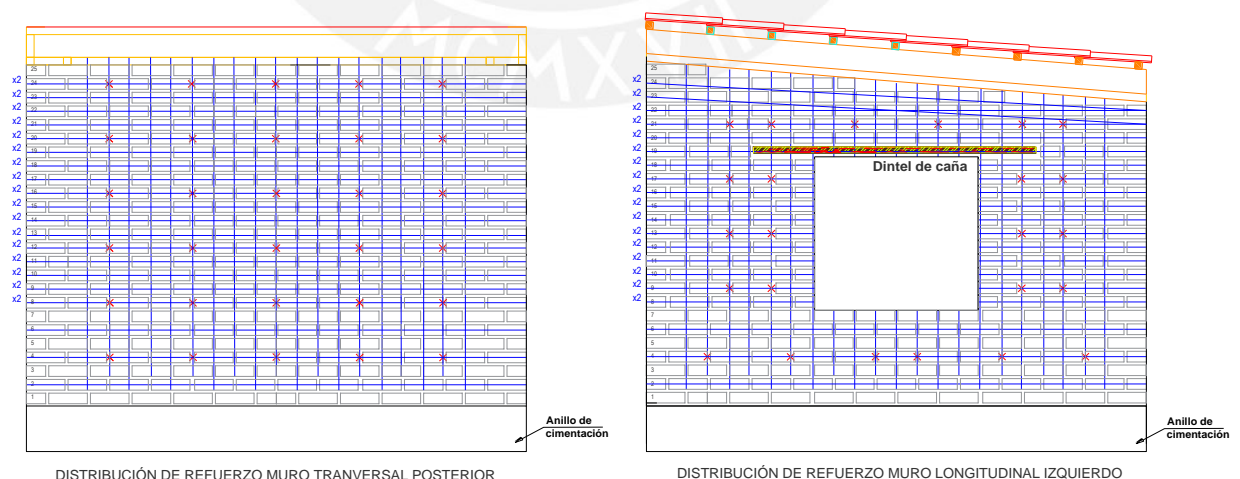


Fig. 5 Selected 5/32" nylon mesh reinforcement configuration for adobe housing model

The nylon ropes were then placed on all walls of the adobe model, according to the designed layout. Figure 6, left shows the chalk marks defining the position of the ropes and a student drilling holes in the mortar for the crossties. On the right is a photo of a horizontal rope being tightened by means of a composite knot, as metal turnbuckles are too expensive.



Fig. 6 Reinforcement process. Left: drilling crosstie holes. Right: tying the horizontal ropes

5. SHAKING TABLE TEST

The reinforced model was tested with a single intense simulated ground motion with 1.4 g peak horizontal acceleration. During shaking all the walls broke down in large blocks, as expected, but the ropes were able to prevent their overturning and returned the pieces to their original locations. At the end of the test, the model was severely damaged but the integrity of the house was maintained. Most of the ropes did not go beyond their elastic limit. However, some front wall vertical ropes failed because they were cut by the wooden crown beam.

In spite of the heavy damage sustained by the adobe walls, the dynamic response was of the model was deemed adequate because structural integrity was maintained and collapse was avoided. This proved that the proposed design method, at least in this case, is reasonable.

Figure 7 shows the model before and after the shaking table test.



Figure 7. Adobe model before and after the intense shaking table test

The proposed design procedure is relatively easy to implement using commercial finite element software. It is hoped that it will be used in future projects.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The proposed reinforced system for adobe structures located in seismic areas was effective in providing structural safety to a full-scale single-story model of a typical adobe house model, as it sustained a very intense ground motion without collapse. This result is encouraging, because this reinforcement is relatively cheap and easy to implement in new or existing adobe houses.

Further research is needed to extend this system to larger constructions, such as historical earthen monuments and multistory housing buildings. The potential to mitigate the seismic risk of many families throughout the world is important. A large effort would be required to provide the training and the materials required to protect the buildings at risk.

Acknowledgements

The funding for this project provided by the PUCP's Research Office is gratefully acknowledged. Many persons contributed to its completion: Lecturers Malena Serrano and Carlos Sosa; Laboratory Director Gladys Villa-García and the Lab staff; civil engineering students Javier Sarmiento, Qenti Herencia, and many others. The authors are grateful to all of them.

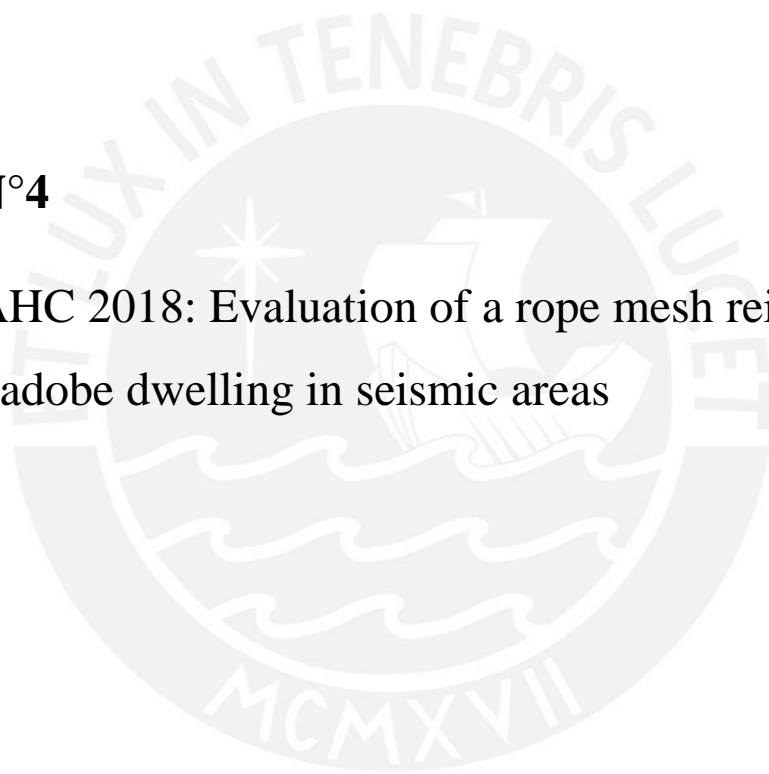
References

Blondet M, Vargas J, Tarque SN, Soto EJ, Sosa CA y Sarmiento JC. (2016). Seismic protection of earthen vernacular and historical constructions. 10th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions SAHC2016. London: CRC Press.

NTE E080. (2017). Norma Técnica de Edificación, Diseño y Construcción con Tierra Reforzada. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima, Peru.

ANEXO N°4

PAPER SAHC 2018: Evaluation of a rope mesh reinforcement system for adobe dwelling in seismic areas



Evaluation of a rope mesh reinforcement system for adobe dwellings in seismic areas

Marcial Blondet¹, Nicola Tarque², Julio Vargas³ and Hillary Vargas⁴

Abstract. Throughout the world millions of people are at unacceptable risk because they live in unreinforced earthen dwellings, which have consistently shown extremely poor structural behavior during earthquakes. This article presents a design procedure for the structural reinforcement system for one-story earthen constructions located in seismic areas. The proposed reinforcement consists of a mesh made of nylon ropes which envelopes completely all the earthen walls and maintains structural integrity even after the walls have been significantly damaged. It is thought that its use has the potential to protect the lives of millions of families which are currently at risk, and the integrity of invaluable earthen historical monuments.

Keywords: reinforcement, adobe buildings, seismic vulnerability, earthen constructions, dynamic test

1 Introduction

Almost every single time earthquakes occur in areas where construction with earth is common, there are tragic losses in human lives and significant property damage. Therefore, there is an urgent need to develop simple and economical reinforcement solutions to address this problem and provide safety to millions of families with limited economic resources living in seismic areas around the world, whose only alternative is to build their homes with earth. A group of researchers at the Pontifical Catholic University of Peru (PUCP) have been working since the 1970s to address this problem and have developed several seismic reinforcement systems for earthen constructions [1]. A cheap and simple system developed for one-story earthen dwellings consists of covering all the earthen walls with a mesh made of nylon ropes. During an earthquake, the earthen walls break into large pieces. Combined with a wooden beam at the top of the walls, the rope mesh keeps all the broken wall portions together, preventing their overturning and thus maintains the integrity of the construction and avoiding collapse. This paper describes the development of a simple design procedure to specify the characteristics of the rope mesh reinforcement required to protect a given earthen construction, and an experimental validation of the proposed design method via a large-scale earthquake seismic simulation test on a one-story adobe housing model.

¹ Professor, Department of Civil Engineering, Pontificia Universidad Católica del Perú - PUCP, Lima, Peru, mblondet@pucp.edu.pe

² Associate Professor, Department of Civil Engineering, Pontificia Universidad Católica del Perú - PUCP, Lima, Peru, sntarque@pucp.edu.pe

³ Professor, Department of Civil Engineering, Pontificia Universidad Católica del Perú - PUCP, Lima, Peru, jhvargas@pucp.edu.pe

⁴ Student, School of Science and Engineering, Pontificia Universidad Católica del Perú - PUCP, Lima, Peru, vargas.hillary@pucp.pe

2 Rope mesh reinforcement system for one-storey earthen houses

Seismic failure of adobe structures is triggered by the progressive formation of cracks in their walls due to the low tensile strength of the adobe masonry. During seismic shaking earthen walls break in large pieces that subsequently overturn due to out-of-plane forces causing structural collapse. The objective of the proposed rope reinforcement is to prevent the overturning of wall portions by completely enveloping all the walls with a mesh made of synthetic ropes. Natural ropes would tend to disintegrate with time. The mesh is composed of an arrangement of vertical and horizontal ropes placed on both faces of each wall.

Preliminary seismic testing of a large-scale one-story adobe house model was conducted on the unidirectional shaking table at the PUCP's Structural Laboratory, in order to assess the feasibility of this reinforcement system [2]. The model consisted of four adobe walls 3.00 m long and 0.25 m wide, with a sloped roof. Adobe blocks measuring 250 x 250 x 90 mm were made using soil, straw and coarse sand (5:1:1 in volume). The adobe blocks were joined with 20 mm thick mud mortar also made with soil, straw and coarse sand (3:1:1 in volume). The model was first tested on the unidirectional shaking table in order to induce considerable seismic-like cracks (**Fig. 1a**), which were then repaired with mud injection. The damaged model was then reinforced with an external mesh made with 1/4" nominal diameter nylon ropes (halyard). The experimental tests on the ropes resulted in an ultimate tensile strength of 1.70 kN and a module of elasticity of 95 MPa. The mesh spacing was not specified according to the mechanical characteristics of the selected rope or the principles of structural mechanics. Instead, rope spacing was selected according to the layout of the adobe masonry. The separation of the vertical ropes was equal to the length of one adobe block and that of the horizontal ropes was equal to the height of two and a half courses of the adobe masonry. All ropes were tensioned by means of metal turnbuckles. The meshes on both faces of each wall were joined together by 1/8" nylon ropes, which crossed the walls through the mortar joints at selected places. The model was then tested again on the shaking table with successive motion phases with horizontal acceleration of 0.3, 0.6, 0.9 and 1.3 g, respectively. The seismic signal used for the dynamic tests was based on the horizontal acceleration record from the May 31st, 1970, Peruvian earthquake, component N08W recorded in Lima. This earthquake had a M_w 7.9 magnitude, a maximum intensity XI in MMI and generated an avalanche in Huaraz (northern Peruvian city). During the movement the model suffered significant damage, consisting mainly on the walls separating in large blocks. The mesh reinforcement provided, however, was able to keep the wall pieces together, thus avoiding partial collapses and preserving the integrity of the structure, as shown in **Fig. 1b**.



Figure 1. Sketch of damage pattern and general view of the model after shaking table testing.

The selected rope mesh reinforcement was deemed adequate to provide safety to the adobe model tested on the shaking table. As a result of this limited experimental validation, the mesh reinforcing system is now accepted in the Peruvian Code for earthen construction [3] even though a design procedure was not yet available.

3 Calculation of maximum forces at the reinforcement systems

A simple mathematical model of an overturning rigid block attached with elastic ropes to a rigid structure can be used to estimate the forces in the ropes caused by the ground shaking. **Fig. 2** illustrates this process. **Fig. 2a** shows an adobe house model tested on the shaking table. The shaded area highlights a detached portion of wall due to out-of-plane actions. **Fig. 2b** shows a simplified rigid block model of the interaction between the main structure (Block A) and the detached wall portion (Block B). Both blocks are joined by a set of n horizontal elastic ropes, placed to prevent the overturning of block B. **Fig. 2c** shows the free body diagram of block B, including inertia forces. Block A is fixed to the ground, which moves with absolute displacement x_0 . Block B has mass m_B , central moment of inertia I_G , and pivots around ground point O. Relative displacement (with respect to O) of any point i located on block B at height h_i is noted as u_i . A viscous damper (not shown) with damping factor ζ_B joins block A and the center of mass G of block B.

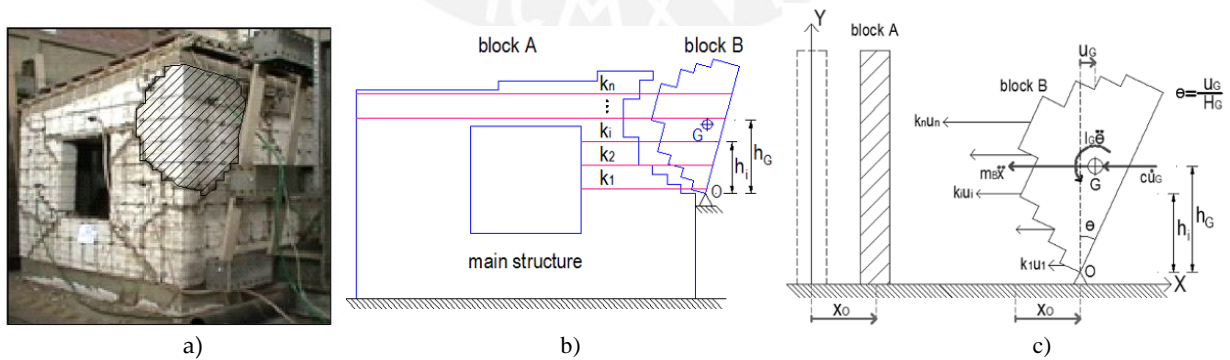


Figure 2. Interaction between adobe blocks and reinforcement due to seismic motion.

a) Damaged model; b) simplified block model; c) free body diagram of block B.

The resulting equation of motion of block B, obtained through dynamic equilibrium, is given in Eq. (1).

$$M_e \ddot{u}_G + C_e \dot{u}_G + K_e u_G = -m_B \ddot{u}_0 \quad (1)$$

where the equivalent coefficients for mass (M_e), stiffness (K_e) and damping (C_e) are given by $M_e = I_G/h_G^2$, $K_e = (\sum k_i h_i^2)/h_G^2$ and $C_e = 2\xi_B\sqrt{K_e M_e}$. The natural vibration period of the block is $T_n = 2\pi\sqrt{M_e/K_e}$. Therefore, if the pseudo-acceleration response spectrum of the ground motion is $S_a(T, \zeta)$, the peak horizontal acceleration of the center of mass G of block B is $S_a(T_n, \zeta)$, and the force in cable i is given by Eq. (2).

$$F_i = \frac{h_i}{h_G} k_i S_a(T_n, \xi) (2\pi/T_n)^2 \quad (2)$$

This simple analysis procedure was applied to estimate the forces on three types of reinforcement provided to identical large-scale adobe models previously tested on the PUCP's shaking table: 1) nylon rope (halyard) mesh, 2) biaxial geogrid mesh, and 3) plastic safety mesh. **Figure 3** shows the table pseudo-acceleration spectrum for 10% damping ratio [2] as well as the natural periods and pseudo-acceleration levels corresponding to the main overturning block for each case. In all cases, the unidirectional table motion (scaled from Lima's 1970 earthquake) had a peak acceleration of around 1.50 g, for which an unreinforced adobe model would have collapsed.

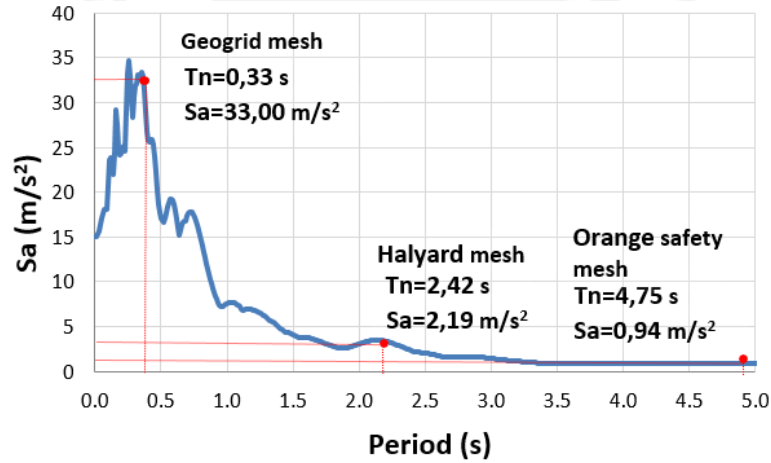


Figure 3. Pseudo-acceleration spectrum corresponding to shaking table motion.

Figure 4 shows the values of the calculated peak load on the most stressed rope f_{max} during each test, together with the corresponding specified working load f_w . All reinforcements were selected using purely geometrical reasons (no structural design was involved). In each case, the calculations were consistent with the dynamic response observed in the laboratory: the adobe walls broke in large pieces and the mesh reinforcement was able to prevent the overturning of the broken pieces. Also, although the peak forces in the nylon rope (halyard) mesh and the geogrid strands were well below their working limit ($f_{max} < f_w$), the plastic safety mesh failed locally ($f_{max} > f_w$), indicating that in this case the provided reinforcement was not sufficient.


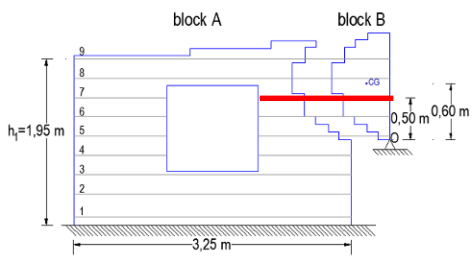

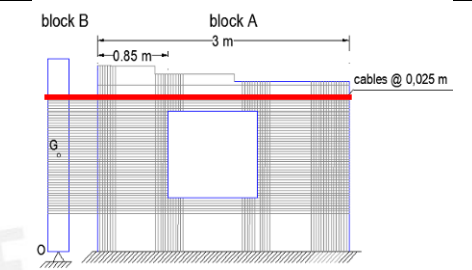

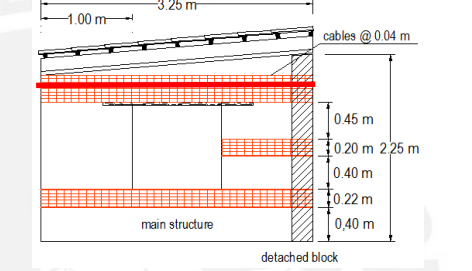
1) Halyard ropes			$I_o = 320 \text{ kg-m}^2$ $k_i = 3.00 \text{ kN/m}$ $T_n = 2.42 \text{ s}$ $f_{max} = 0.83 \text{ kN}$ $f_w = 1.0 \text{ kN}$ Reinforcement OK
2) Geogrid mesh			$I_o = 2590 \text{ kg-m}^2$ $k_i = 1.80 \text{ kN/m}$ $T_n = 0.33 \text{ s}$ $f_{max} = 0.44 \text{ kN}$ $f_w = 6.0 \text{ kN}$ Overdesigned
3) Safety plastic mesh			$I_o = 2590 \text{ kg-m}^2$ $k_i = 0.12 \text{ kN/m}$ $T_n = 4.75 \text{ s}$ $f_{max} = 0.10 \text{ kN}$ $f_w = 0.035 \text{ kN}$ Underreinforced

Figure 4. Peak forces in different types of reinforcement.

4 Proposed design procedure

The simplified seismic overturning analysis of earthen wall blocks was then incorporated into a design procedure which could be applied to any one-story earthen building. The proposed design procedure is illustrated in the following example.

A large-scale model of a typical Andean one-story adobe house, similar to those studied in previous projects was built at the PUCP's Structural Laboratory [4]. Its dimensions are shown in **Fig. 5** below.

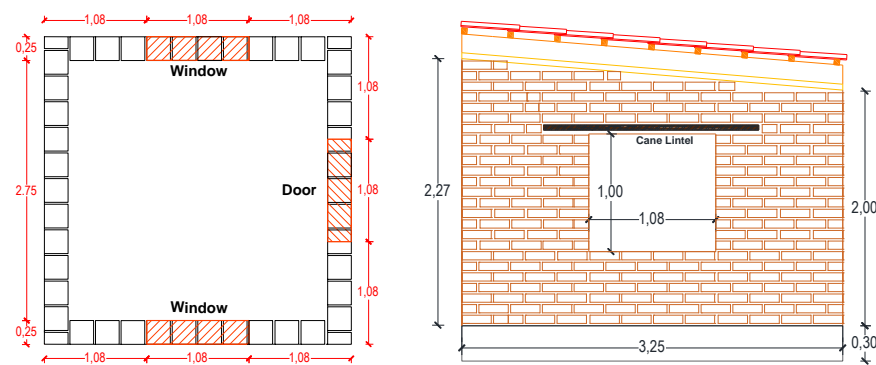


Figure 5. Large-scale adobe house model.

The design procedure for the seismic nylon mesh reinforcement for this model was as follows:

Step 1) Selection of design ground motion: The largest shaking table movement imposed during previous tests was selected as design ground motion. The corresponding pseudo-acceleration spectrum (10% damping) is shown in **Fig. 3**. Design ground displacement and acceleration were $D_0 = 130$ mm and $A_0 = 1.50$ g, respectively.

Step 2) Selection of nylon rope to be used for reinforcement: A widely available 5/32" nominal diameter rope was selected to reinforce the model. Its ultimate tensile strength is 0.7 kN, and the admissible work force is 0.35 kN. Its module of elasticity is 0.64 MPa. In this case, ropes would be joined by knots (turnbuckles are expensive).

Step 3) Definition of potential overturning block mechanisms: Based on field observations of seismic damage on one-story adobe dwellings and on the architectonical configuration of the model, the block overturning mechanisms shown in **Fig. 6** were selected for seismic analysis.

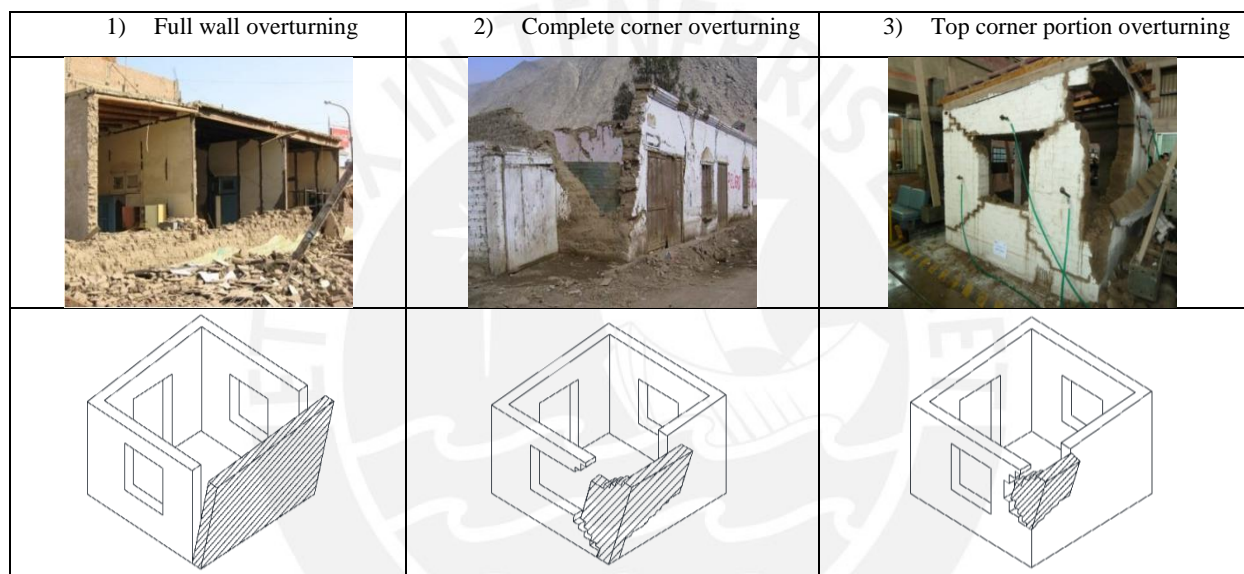


Figure 6. Wall block overturning mechanisms analyzed

Step 4) Selection of rope spacing: Several configurations of rope mesh spacing were evaluated. After several iterations, the mesh configuration shown in **Fig. 7** was selected because the computed forces in all ropes were below the specified work load, for all overturning mechanisms. The critical mechanism corresponded to the overturning of the full back wall (mechanism 1), and the force in the critical rope was estimated at 0.30 kN, below the working force level of 0.35 kN. (The peak force for mechanisms 2 and 3 were 0.25 and 0.19 kN, respectively).

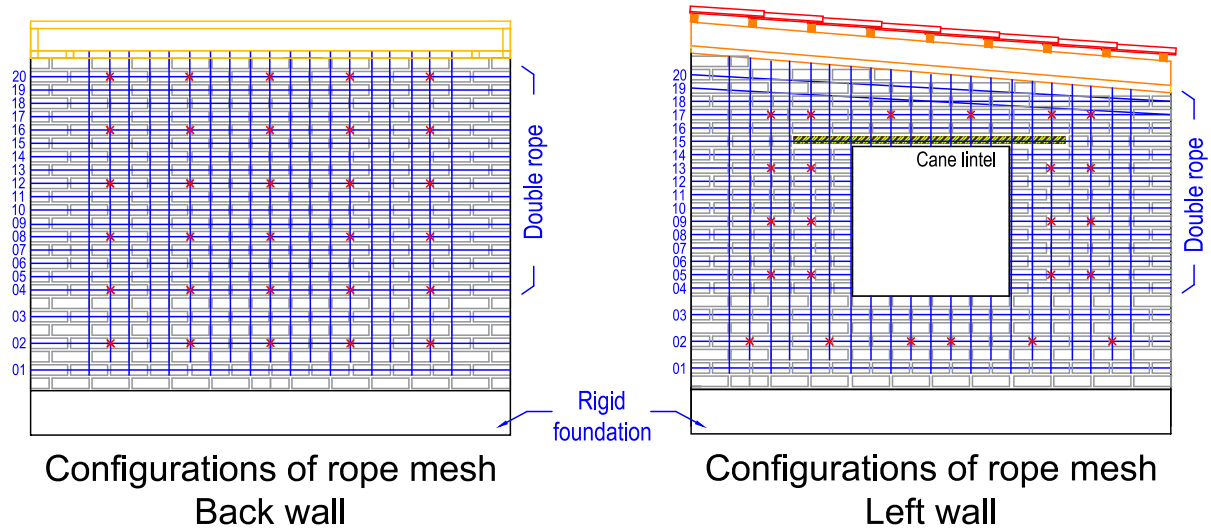


Figure 7. Selected mesh configuration for 5/32" nylon ropes.

Horizontal ropes were spaced at 0.14 m (distance between two adjacent adobe masonry courses) below the window lintel, and at 0.07 m above the window lintel. Horizontal ropes were always placed in the middle of an adobe block (mortar joints were avoided, as they are weaker than the adobe blocks). Vertical ropes start on the bottom mortar joint and go over the wooden crown beam (this is not shown in the drawings). Twenty rows of horizontal ropes were needed. The vertical ropes were spaced at 125 mm. They span from the concrete foundation beam to the top of the wooden crown beam. This rope mesh configuration provides an estimated Factor of Safety (ultimate force divided by seismic force) of 2.3 and was considered adequate. Note that provided rope spacing is considerably shorter than in the case of the previous model (with 1/4" mesh), and therefore placing the reinforcement on the walls was more labor intensive. The cost of the required ropes in Peru is approximately 6.50 US dollars per square meter of floor plan.

5 Experimental validation

The nylon ropes were placed on all walls of the adobe model and the reinforced model was tested with a single intense simulated ground motion with 1.4 g peak horizontal acceleration. During shaking all the walls broke down in large blocks, as expected, but the ropes were able to prevent their overturning and returned the wall pieces to their original locations. At the end of the test, the model was severely damaged but the integrity of the house was maintained. Most of the ropes did not go beyond their elastic limit. However, some front wall vertical ropes failed because they were cut by the wooden crown beam. In spite of the heavy damage sustained by the adobe walls, the dynamic response of the model was deemed adequate because structural integrity was maintained and collapse was avoided. **Fig. 8** shows the model before and after the shaking table test.



Figure 8. Adobe model before and after the intense shaking table test

This test proved that the proposed design method is adequate to specify the rope reinforcement required to avoid collapse of one-story earthen buildings during strong seismic shaking, and thus prevent the loss of life of the persons inhabiting similar houses.

6 Conclusions

The proposed reinforced system for one-story adobe constructions located in seismic areas was effective in providing structural safety to a large-scale model of a typical adobe house, as it sustained a very intense ground motion without collapse. This result is encouraging, because this reinforcement is relatively cheap and easy to implement in new or existing adobe houses.

The rope mesh reinforcement, however, is still probably unaffordable for many rural families in developing countries. It seems, therefore, that participation of government and development agencies is indispensable to provide the materials and required training.

As this system has been proven only for one-story constructions under unidirectional shaking, it is clear that further research is needed to extend this system to larger constructions, such as historical earthen monuments and multistory housing buildings.

7 References

- Blondet M, Vargas J, Tarque N, et al. (2011) Seismic resistant earthen construction: the contemporary experience at the Pontificia Universidad Católica del Perú; *From J. Informes de la Construcción* 63(523): 41-50
- Blondet M, Vargas J, Tarque N, et al. (2016) Seismic protection of earthen vernacular and historical constructions. In: Balen V, Verstryng (eds) *SAHC 2016 - Structural Analysis Historical Constructions – Anamnesis, diagnosis, therapy, controls* CRC Press.
- NTE E080 (2017) Norma Técnica de Edificación, Adobe Peruvian Code, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Resolución Ministerial N121-2017 Vivienda.
- Blondet M, Vargas J, Torrealva D, et al. (2006) Seismic reinforcement of adobe houses using external polymer mesh. In: *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Paper 632, Geneva, Switzerland.